



Dobbelt styrbar 3-bladet vindmølle: Sammenligning mellem pitchreguleret vindmølle og pitchreguleret vindmølle med variabelt omløbstal

Bindner, H.; Hansen, Anca Daniela

Publication date:
1998

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Bindner, H., & Hansen, A. D. (1998). *Dobbelt styrbar 3-bladet vindmølle: Sammenligning mellem pitchreguleret vindmølle og pitchreguleret vindmølle med variabelt omløbstal*. Denmark. Forskningscenter Risoe. Risoe-R No. 1072(DA)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

**Dobbelt styrbar 3-bladet
vindmølle:**

**Sammenlingning mellem
pitchreguleret vindmølle og
pitchreguleret vindmølle med
variabelt omløbstal**

Henrik Bindner, Anca Hansen

Resumé

Denne rapport er udarbejdet under EFP-96 projektet "Dobbelt styrbar 3-bladet vindmølle". Formålet med projektet er at undersøge en 3-bladet vindmølle med både variabelt omløbstal og variabel pitchvinkel. I undersøgelsen indgår effektproduktion, elkvalitet og strukturelle laster på vindmøllen på en sådan vindmølle. Undersøgelsen foregår både teoretisk og praktisk.

Nærværende rapport er 1 af 2 rapporter:

- Reguleringsstrategier (R-1071)
- Sammenligning mellem pitchreguleret vindmølle og pitchreguleret vindmølle med variabelt omløbstal (R-1072).

Reguleringsstrategierne præsenteret i (R-1071) er afprøvet på en forsøgsopstilling, der indeholder en VESTAS V27-225 kW mølle, en SAMI-STAR 400 kVA 4-kvadrant frekvensomformer fra ABB og et målesystem. Måleresultaterne er præsenteret i nærværende rapport. Der foretages en sammenligning af målinger foretaget ved henholdsvis fast- og variabeltomløbstalsdrift.

Arbejdet er udført i samarbejde med Vestas Wind Systems A/S, ABB Energi og Industri A/S og Forskningscenter Risø. Projektet er delvis finansieret af Energistyrelsen, journal nr. 1363/96-002.

ISBN 87-550-2441-6
ISSN 0106-2840

Afdelingen for Informationsservice · Risø · 1999

Indhold

1	Indledning	<i>4</i>
2	Forsøgsopstilling	<i>4</i>
	2.1fl Møllenfl	<i>4</i>
	2.2fl Frekvensomformerfl	<i>4</i>
	2.3fl Styringfl	<i>4</i>
	2.4fl Målesystemfl	<i>5</i>
3	Reguleringsstrategier for fast og variabelt omløbstal	<i>5</i>
4	Energiproduktion	<i>7</i>
5	Reguleringskvalitet	<i>14</i>
	5.1fl Generel opførsel af vindmøllen i de to driftsituationerfl	<i>14</i>
	5.2fl Elkvalitetfl	<i>17</i>
	5.3fl Vinge- og tårnlasterfl	<i>27</i>
	5.4fl Øvrige lasterfl	<i>30</i>
6	Erfaringer	<i>36</i>
7	Konklusion	<i>37</i>
8	Bilag: Målesystem	<i>38</i>

1 Indledning

Denne rapport præsenterer måleresultater udført på en vindmølle VESTAS V29-225 kW tilsluttet nettet via en ABB SAMISTAR 400 kVA frekvensomformer og modificeret til også at kunne køre med variabelt opløbstal.

Formålet med disse målinger er at sammenligne ydelse og egenskaber af en pitchreguleret vindmølle med en pitchreguleret vindmølle med variabelt opløbstal.

2 Forsøgsopstilling

Forsøgsopstillingen er opstillet hos Vestas, Lem. Den består af en VESTAS V29-225 kW mølle, en SAMI-STAR 400 kVA 4-kvadrant frekvensomformer fra ABB, en styreenhed og et målesystem. På denne forsøgsopstilling er der foretaget eksperimenter med forskellige drifts- og reguleringsstrategier.

2.1 Møllen

Der blev taget udgangspunkt i en standard pitchreguleret vindmølle VESTAS V29-225 kW. Mekanisk er møllen ikke blevet modificeret. Vindmøllens styring er blevet ombygget til at kunne køre både med variabel pitch og med fast eller variabelt opløbstal. Møllen har to generatorer på 50 hhv. 225 kW.

2.2 Frekvensomformer

Frekvensomformer er en SAMI-STAR 400 kVA 4-kvadrant fra ABB. Kontakterne er af GTO (Gate Turn Of Thyristor) typen og tændingsmønsteret er puls-bredde-moduleret (Pulse Width Modulated).

2.3 Styring

Styringen af vindmøllen, både i normal og i variabelomløbstalsdrift, varetages af vindmøllens VMP (Vestas MultiProcessor) styring. Den er modificeret til at styre vindmøllen ifølge den valgte strategi, når den er tilsluttet nettet via frekvensomformer. VMP styringen foretager automatisk skift mellem de to driftstilstande hvert 10. minut.

I normal driftssituationen optimeres produktionen ved at benytte den lille generator indtil 7 m/s, hvorefter der skiftes til den store generator. Under mærkeeffekt styres pitchvinklen tillige til optimal produktion. Effekten begrænses til mærkeeffekt vha. pitchregulering.

I variabelomløbstalsdrift styres produktionen efter en effekt-omløbstals karakteristisk. Styringen sender på basis af det aktuelle opløbstal en effektreference til frekvensomformer. Derudover begrænses opløbstallet ved hjælp af pitchregulering.

I begge situationer følges vindmøllens sædvanlige sikkerhedsstrategi.

2.4 Målesystem

Dataopsamlingssystemet indeholder tre computere. De målte signaler inkluderer blandt andet kant og flap bøjning, driv moment, tårn bøjning, den elektriske effekt på hver side af frekvensomformerer og vindhastigheden. Signalerne samples med 32 Hz. Statistik beregnes for hvert minut. Der er opsamlet både statistik og tidsspor, se også bilag.

3 Reguleringsstrategier for fast og variabelt omløbstal

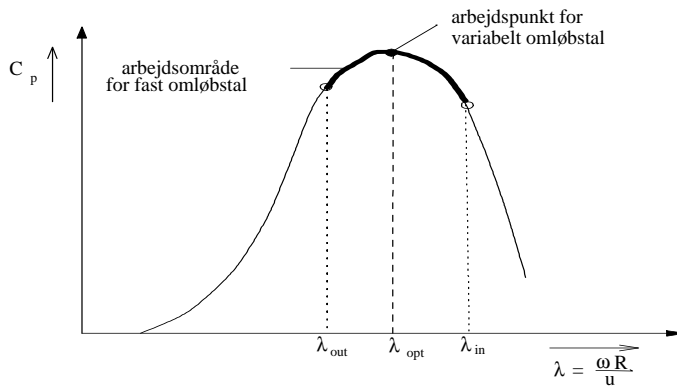
Den fundamentale ligning, der beskriver den mekaniske effekt, som tages ud af vinden af en vindmølle, er:

$$P_{mek} = T \omega_r = \frac{1}{2} \rho A u^3 C_p(\beta, \lambda) \quad (1)$$

hvor T er det drivende moment på rotoren, ω_r er rotorens omløbstal, ρ er luftens massefylde, A er rotorens areal og u vindhastigheden. $C_p(\beta, \lambda)$ er rotorens effektivitet, der er en ulineær funktion af pitchvinklen β og af tindhastighedsforholdet λ , defineret således:

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{u} \quad (2)$$

hvor R er rotorens radius.



Figur 1. Arbejdsområde på C_p -kurven for både fast og variabelt omløbstal, givet en bestemt pitchvinkel.

Som det ses i Figur 1, kan rotoren kun udvikle den optimale mekaniske effekt P_{mek}^{opt} ved et bestemt λ , nemlig λ_{opt} . I den traditionelle pitchregulerende 3-bladede vindmølle (med fast omløbstal) er rotorens effektivitet C_p kun funktion af vindhastigheden u og pitch vinkel β , nemlig:

$$C_p = C_p(\beta, \lambda), \quad \text{hvor} \quad \lambda = \lambda(u) \quad (3)$$

Arbejdspunktet for C_p varierer på C_p -kurven mellem λ_{out} og λ_{in} . Således er rotorens effektivitet C_p ikke hele tiden på den maksimale værdi. For en vindmølle, der har mulighed for at variere omløbstallet ω_r afhænger rotorens effektivitet af både vindhastigheden u , pitchvinkel β og rotorens omløbstal ω_r :

$$C_p = C_p(\beta, \lambda), \quad \text{hvor } \lambda = \lambda(u, \omega_r) \quad (4)$$

Den maksimale C_p, C_p^{\max} , opnås for en givet pitchvinkel, β_{opt} , og et givet tipphastighedsforhold, λ_{opt} . Det betyder at hvis vingerne indstilles til β_{opt} og λ holdes på λ_{opt} ved at ændre ω_r proportionalt med vindhastigheden u , kan man fastholde rotorens effektivitet på C_p^{\max} over et stort vindhastighedsområde. Det betyder, at der kan opnås nogen effektproduktionsgevinst ved at bruge variabelt omløbstal frem for at bruge fast omløbstal. Desuden kan start vindhastigheden for vindmøllen reduceres, fordi den optimale effektivitet også holdes konstant ved lave vindhastigheder.

Når vindmøllen arbejder i det optimale driftspunkt er effektproduktionen givet ved:

$$P_{mek}^{\max}(u) = \left(\frac{\rho A R^3 C_p^{\max}}{2 \lambda_{opt}^3} \right) \omega_r^3(u) \quad (5)$$

Det bemærkes, at den maksimale effekt varierer med rotorens omløbstal efter en kubisk funktion.

Styringen af vindmøllen deles op i to intervaller:

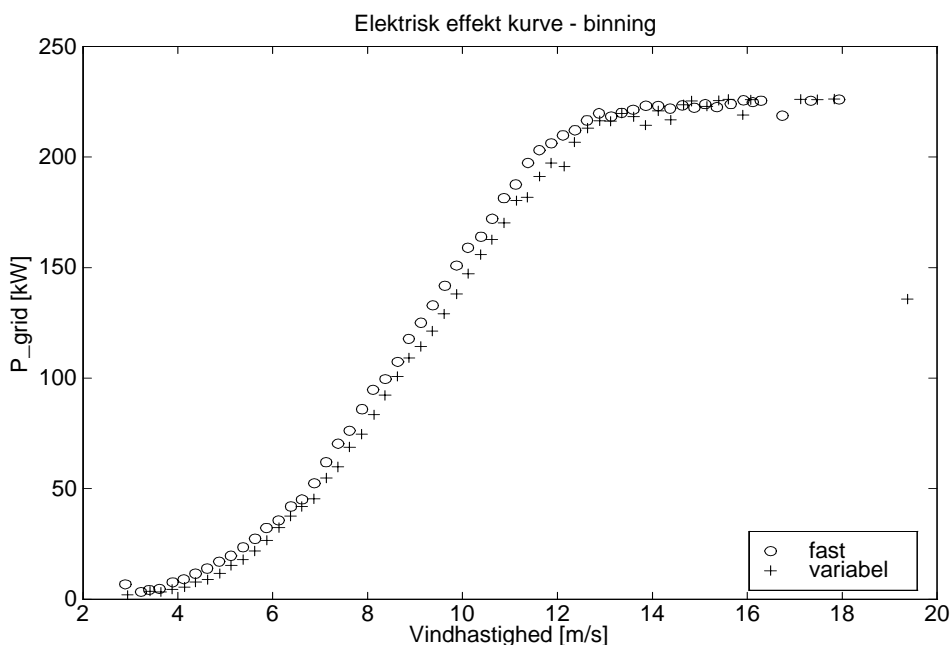
- Effektoptimering under nominel effekt, hvor målet er at maksimere produktionen fra vindmøllen.
- Effektbegrænsning, hvor målet er at holde den nominelle effekt.

Når vindmøllen er i normal drift optimeres produktionen ved at benytte den lille generator ved lave vindhastigheder, således at omløbstallet reduceres tillige med generatortabet. Herudover følger pitchvinklen en kurve der optimerer produktionen for det givne omløbstal og vindhastighed. Til effektbegrænsning anvendes alene pitchregulering.

For at optimere effektproduktionen, når vindmøllen er i frekvensomformerdrift, er det nødvendigt at holde rotor effektiviteten så tæt som muligt på C_p^{\max} . Dette gøres ved at fastholde $\lambda = \lambda_{opt} = \frac{\omega_r R}{u}$ konstant. Imidlertid er det ikke muligt direkte at styre efter optimalt tipphastighedsforhold λ_{opt} , idet det ikke er muligt at måle vindhastigheden med tilstrækkelig nøjagtighed. Det er derfor ønskeligt at finde en måde at styre vindmøllen på så det undgås at anvende vindhastigheden. I stedet for at bruge vindhastigheden direkte, kan det udnyttes at det vides, hvad effektproduktionen skal være for at være optimal for et givet omløbstal. Strategien bliver derfor, at ud fra det aktuelle omløbstal sættes en effektreference til frekvensomformerer og denne effektreference er bestemt som den effekt, der er maksimal ved det aktuelle omløbstal. Under kvasistatiske forhold vil det give en effektproduktion som er optimal. Det optimale forhold mellem omløbstal og effekt beregnes forud på basis af rotorens aerodynamiske data. Når mærkevind nås benyttes pitchregulering til at begrænse omløbstallet.

4 Energiproduktion

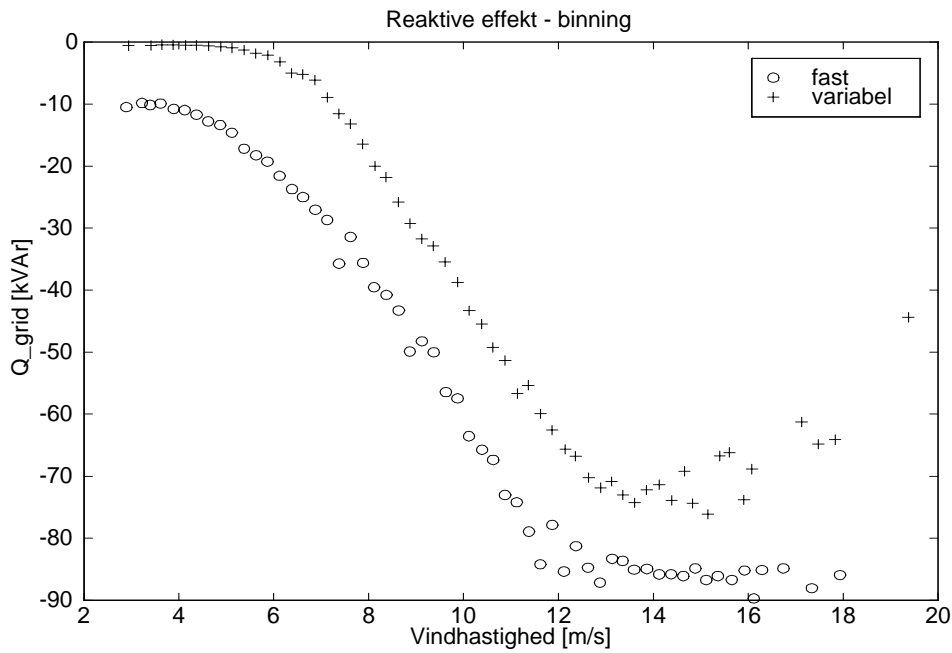
Som det blev understreget før, er formålet med denne rapport, at få et indtryk af hvordan møllen opfører sig i de to driftssituationer, nemlig med henholdsvis fast og variabelt omløbstal. Da det er ønskeligt at få så meget energi ud af vinden som muligt, er første trin i sammenligningen at kigge på energiproduktionen. Denne analyse er baseret på 1 minut middelværdier fra perioden uge 28 til 37 1998. Det skal her understreges, at der i de kommende effektkurver kun anvendes for vindretninger der befinder sig i området $180^\circ \pm 45^\circ$. Dette skyldes at meteorologimasten er placeret syd forhold til vindmøllen og samt øvrige lokale forhold.



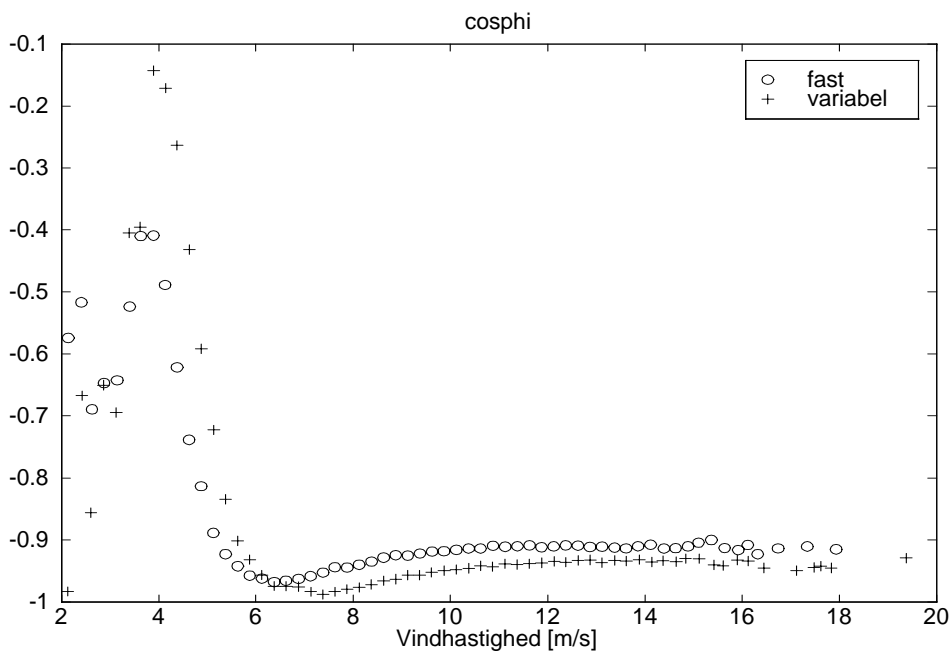
Figur 2. Effektkurve P_{grid} (elektrisk effekt ved nettilslutningspunktet, fra sektor $180^\circ \pm 45^\circ$, middelværdier, fast og variabelt omløbstal).

Effektkurvene for aktiv effekt for begge strategier er vist i Figur 2. Figuren er baseret på målinger af den producerede aktive effekt (elektrisk effekt). Trods alle teoretiske forventninger, ses det ud fra målingerne, at der ikke er nogen effektproduktionsgevinst ved at bruge variabelt omløbstal frem for at bruge fast omløbstal. Grunden til dette resultat undersøges senere i afsnittet. Den valgte strategi for variabeltomløbstalsdrift, nemlig uden overspeed, gør at det forventes, at der ville være en lille merproduktion op til ca. 7 m/s. Herefter vil produktionen være lidt lavere, da det ikke tillades at omløbstallet bliver væsentlig højere end ved fastomløbstalsdrift og tabene vil være større som følge af at effekten skal gennem frekvensomformerer med deraf følgende tab.

I Figur 3 er der vist en binning af den reaktive effekt af møllen versus vindhastigheden. Formen af kurven for fastomløbstalsdrift er som forventet, nemlig at den forbrugte reaktive effekt vokser når vindhastigheden stiger, idet magnetiseringen (reaktive effektforbrug) stiger ved voksende effektproduktion.



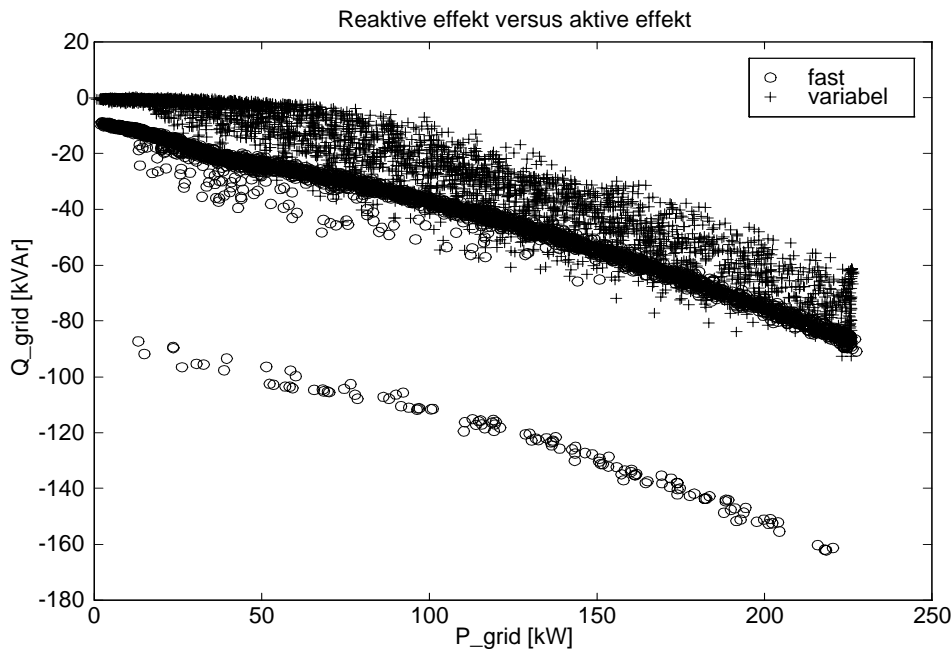
Figur 3. Reaktiv effektkurve (ved nettilslutningspunktet, fra sektor $180^\circ \pm 45^\circ$, middelværdier, fast og variabelt omløbstal).



Figur 4. Effektfaktor.

Derimod ser den reaktive effekt for variabelt omløbstal ikke ud som forventet, idet denne skulle være nul. Konklusionen er at effektfaktoren $\cos(\varphi)$ ikke er holdt konstant til 1, som det ville være ønskeligt. Dette kan ses med det samme i Figur 4. Det bemærkes ydermere at $\cos(\varphi)$ ikke er konstant.

Det er tydeligt, at der er noget i vejen med frekvensomformeren, idet den ikke



Figur 5. Reaktiv effekt versus aktiv effekt.

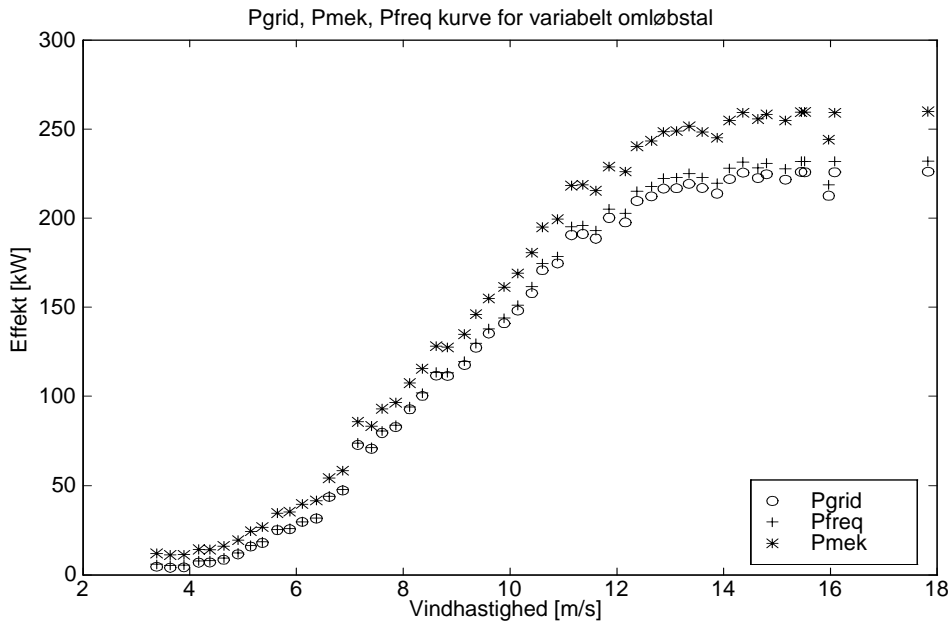
styrer den reaktive effekt rigtigt. Dette kan bekræftes ved at kigge nærmere på den aktive effekt versus den reaktive effekt, som vist i Figuren 5. Der ses en bred spredning (selvom data er 1 minut middelværdi data) i den reaktive effekt Q for variabelt omløbstal situationen. Endvidere bemærkes det, at Q også forsætter med at være meget spredt i effektbegrænsning, det vil sige der hvor den aktive effekt er godt kontrolleret. Forholdet mellem den reaktive effekt og den aktive effekt for fast omløbstal ser fornuftigt ud, nemlig en lidt buet linie som det skal være. Den lavere kurve (under -80 kVAr) er for drift inden kompenseringen er indkoblet.

Figur 6 viser effektkurverne for mekanisk effekt P_{mek} , effekt på generators klemmer P_{freq} og effekt i nettilslutningspunktet P_{grid} for variabelt omløbstal strategien. Ideen er at afbilde, hvor i møllesystemet, der er det største tab. Det ser ud til at være i generatoren/gearkassen. Det bemærkes at datagrundlaget for de viste data i Figur 6 og Figur 7 er reduceret på grund af perioder med manglende data for mekanisk effekt. Det ses at tabet i frekvensomformerer er ganske lille. Det skal i den forbindelse nævnes at der bør udvises forsigtighed med at fordele tabene på de forskellige komponenter, da selv ganske små fejl i kalibreringen kan forskyde tabene væsentligt. Det sikreste er at sammenligne de to driftformer, da de relative værdier ikke er behæftet med samme usikkerhed.

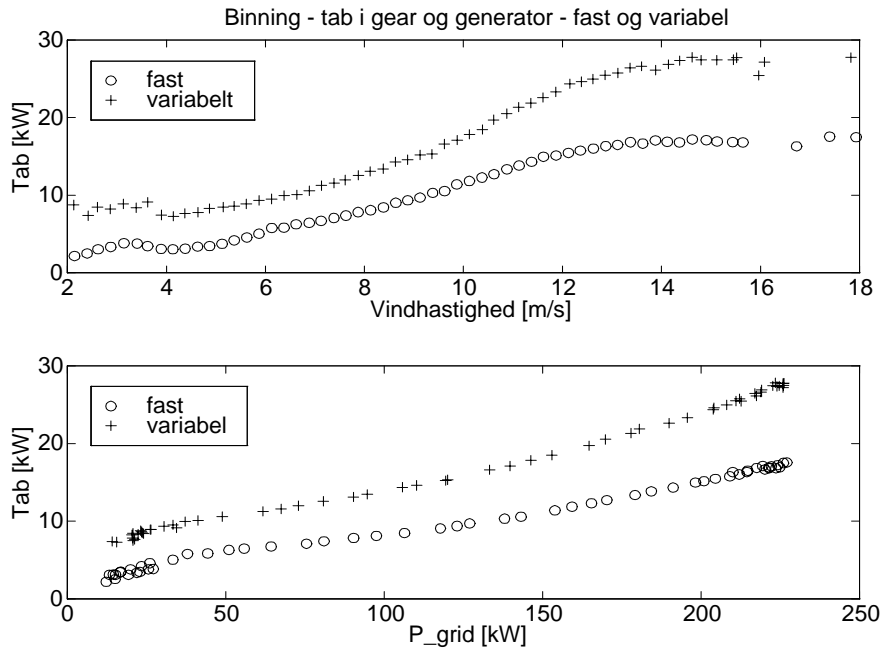
Figur 7 viser tabene i gearet og generatoren som funktion af henholdsvis vindhastigheden og effekten til nettet. Først og fremmest skal det bemærkes, at tabet i generatoren som forventet er større for variabelt omløbstal end for fast omløbstal. Det er dog væsentligt større end forventet, hvilket skyldes den relativt lave skiftfrekvens i frekvensomformerer. Denne lave skiftfrekvens gør at det harmoniske indhold i strømmen til generatoren bliver ganske stor. De harmoniske i strømmen giver ikke anledning til momentdannelse, men bliver udelukkende til tab. Tabets afhængighed med vindhastigheden har en form der efterfølger

effektkurvens form. Således vokser tabet med vindhastigheden efter en kubisk funktion og bliver næsten konstant over mærkevindhastigheden. Som forventet er tabene i gear og generator næsten lineær proportionel med effekten til nettet [kW].

På tilsvarende måde kan tabet i frekvensomformeren analyseres som vist i

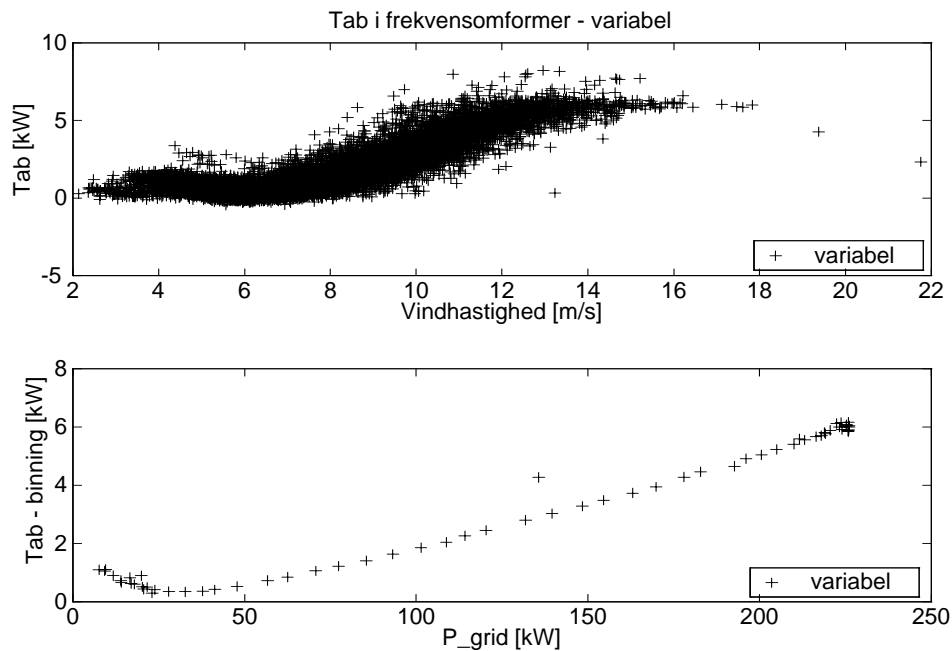


Figur 6. Effektkurverne P_{grid} , P_{freq} , P_{mek} (elektrisk ved nettilslutningspunktet, på generators klemmer og mekanisk, fra sektor $180^\circ \pm 45^\circ$, middelværdier).

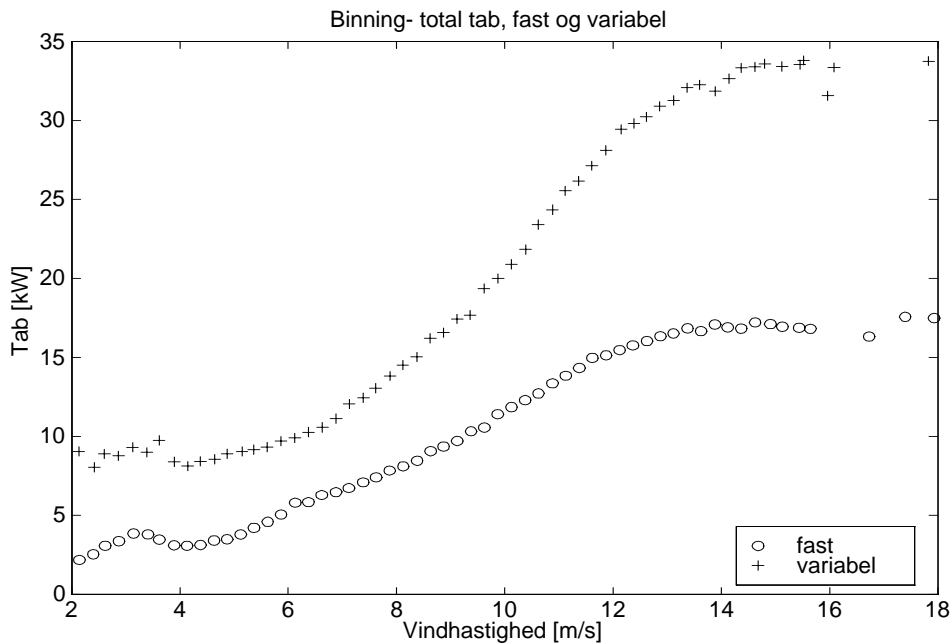


Figur 7. Effekttabet i gear og generator versus vindhastigheden og neteffektet, henholdsvis.

Figur 8. Det bemærkes at tabet i frekvensomformeren er maksimalt 5-7 kW, mens det i generator kan komme op på 28 kW. Det bemærkes også at tabet i frekvensomformeren er meget lavt. Det kan skyldes lidt unøjagtighed i effektmålingen. Det totale tab i gear, generator og frekvensomformeren er afbildet i Figur 9 og den viser, at sammenlignet med fastomløbstalsstrategien, har variabelomløbstalsstrategien et ekstra tab på 20 kW i effekten ved fuld last. Relativt set er det altså meget store andele der mistes i transmissionsystemet og frekvensomformeren over hele driftsområdet.



Figur 8. Effekttab i frekvensomformeren versus vindhastigheden og neteffektet, henholdsvis.



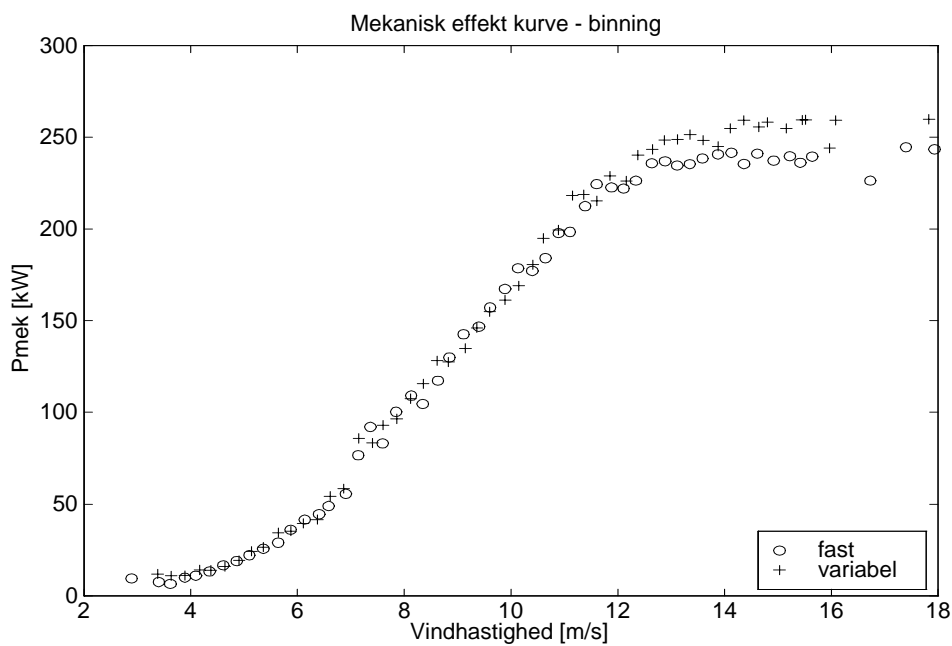
Figur 9. Det totale effekt tab for fast og variabelt omløbstal.

Det er interessant nu at kigge på den mekaniske effekt både for fast og variabelt omløbstal - se Figur 10, for at se om der i det midste er opnået en gevinst i den mekaniske effekt ved at bruge variabelt omløbstal, som det forventes fra teorien. Desværre kan det konkluderes, at variabelomløbstalsstrategien heller ikke giver så meget i den mekaniske effekt sammenlignet med møllen med fast omløbstal og to generatorer.

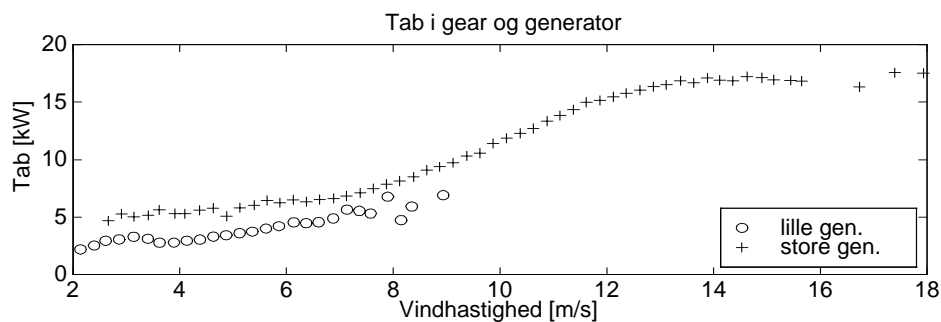
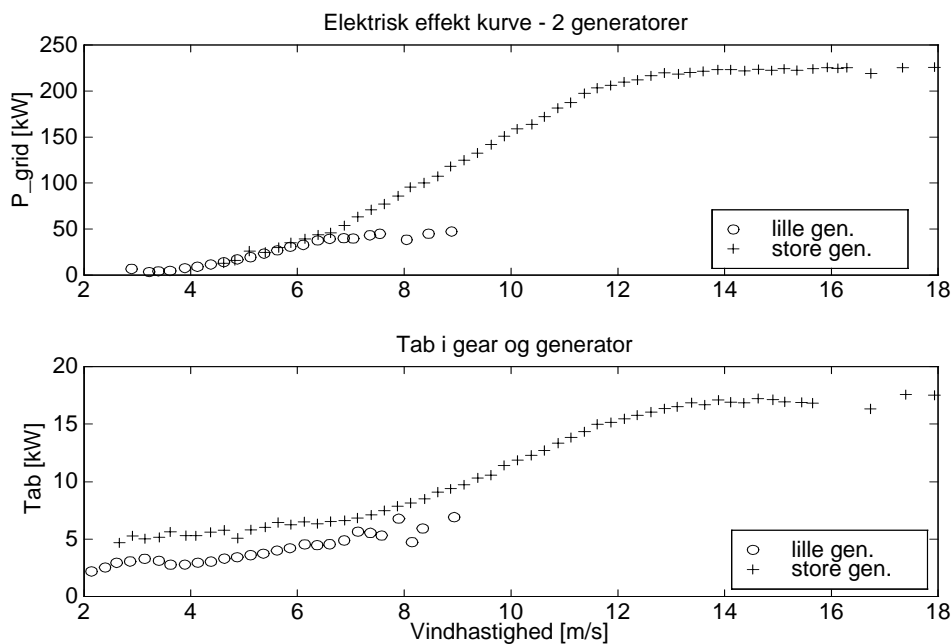
Møllen med to generatorer er i stand til at køre ved to omløbstal, også når den er direkte koblet til nettet. Det at vindmøllens almindelige driftstrategi inkluderer både to hastigheder og optimal pitchvinkelstyring, såkaldt Opti-tip, gør at det forventede øgede effektproduktion er ganske lille.

Ved at kigge på effektkurvene der svarer til de to generatorhastigheder (lille ~ 750 rpm, stor ~ 1000 rpm) for fast omløbstal (se Figur 11), kan det bemærkes, at der produceres større effekt mellem 5.5 m/s og 8.5 m/s ved at bruge den store generator i stedet for den lille generator. Grunden til at der er et overlap mellem de to kurver er, at der er hysteresi i vindhastigheden (med hensyn til stigende eller faldende vindhastighed), når der omkøbles mellem de to generatorer. Figuren viser således, at effektproduktionen måske kunne forbedres lidt ved at optimere tidspunktet for omkobling mellem generatorerne. Det bemærkes at tabet i den store generator, som forventet, er større end i den lille generator også ved lave vindhastigheder. Forklaringen er at en større magnetiseringsstrøm er nødvendigt for at magnetisere den store generator.

Det skal bemærkes, at der ikke er benyttet feltsvækning, det vil sige det maksimale moment generatoren kan levere er det fulde moment ved alle vindhastigheder. Ved at reducere det maksimale moment ved lave vindhastigheder kunne generatortabene reduceres en smule idet magnetiseringsstrømmen derved reduceres.



Figur 10. Mekanisk effektkurve (mekanisk, fra sektor $180^\circ \pm 45^\circ$, fast og variabelt omløbstal).



Figur 11. Effektkurve og effekt tab i gear og generator versus vindhastighed (fast omløbstal, stor og lille generator).

Situation	Middelvindhastighed [m/s]	Standardafvigelse [m/s]
Lav, konstant hast.	8.1	1.02
Lav, variabel hast.	7.8	1.16
Mellem, konstant hast.	9.8	1.26
Mellem, variabel hast.	9.9	1.31
Høj, konstant hast	12.0	2.28
Høj, variabel hast	12.0	2.03

Tabel 1. Vinddata for tidsserier

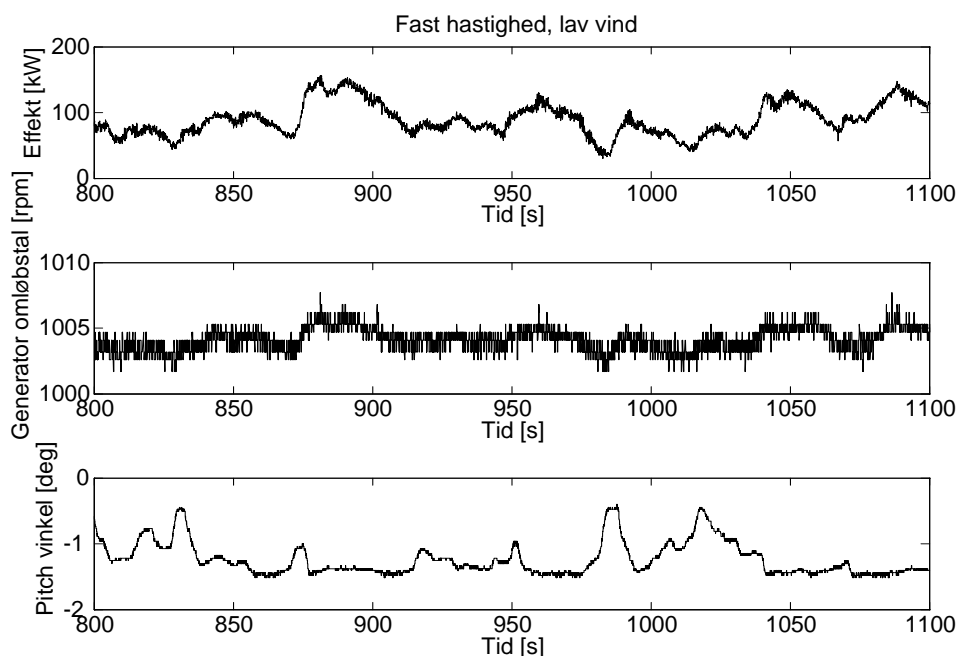
5 Reguleringskalitet

5.1 Generel opførsel af vindmøllen i de to driftsituationer

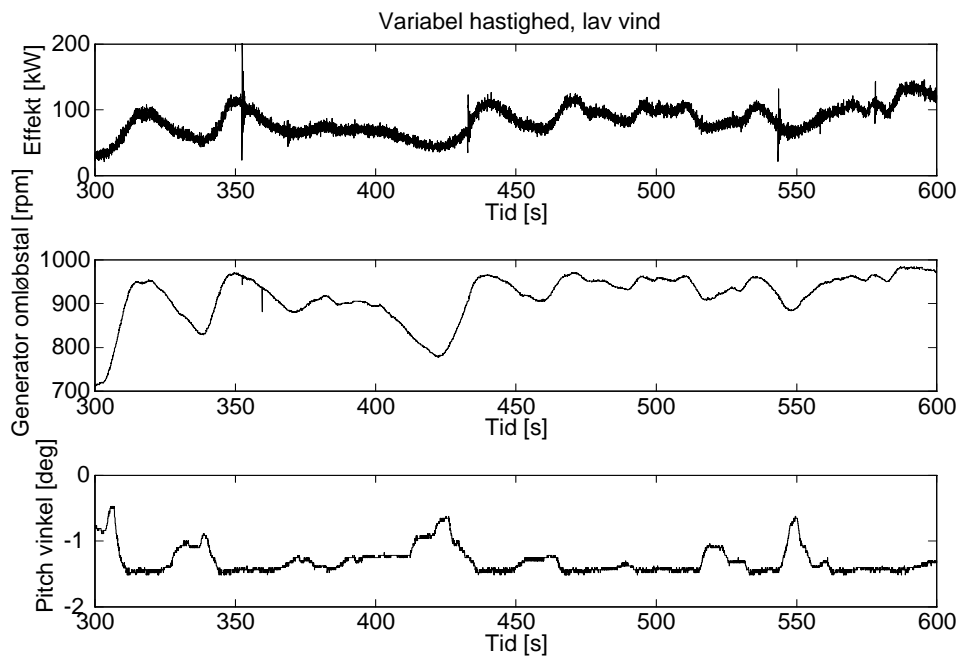
Indledningsvis gives et indtryk af hvordan møllen opfører sig i de to driftsituationer ved hjælp af tidsspor. Disse tidsspor er udsnit fra de senere i afsnittet anvendte tidsserier til beregning af Power Spectrum Densities, PSD.

De tidsserier, der benyttes er opsamlet 06.08.1998 hhv. 03.09.1998 og har for hver af de analyserede situationer følgende middelvindhastighed og standardafvigelse i Tabel 1.

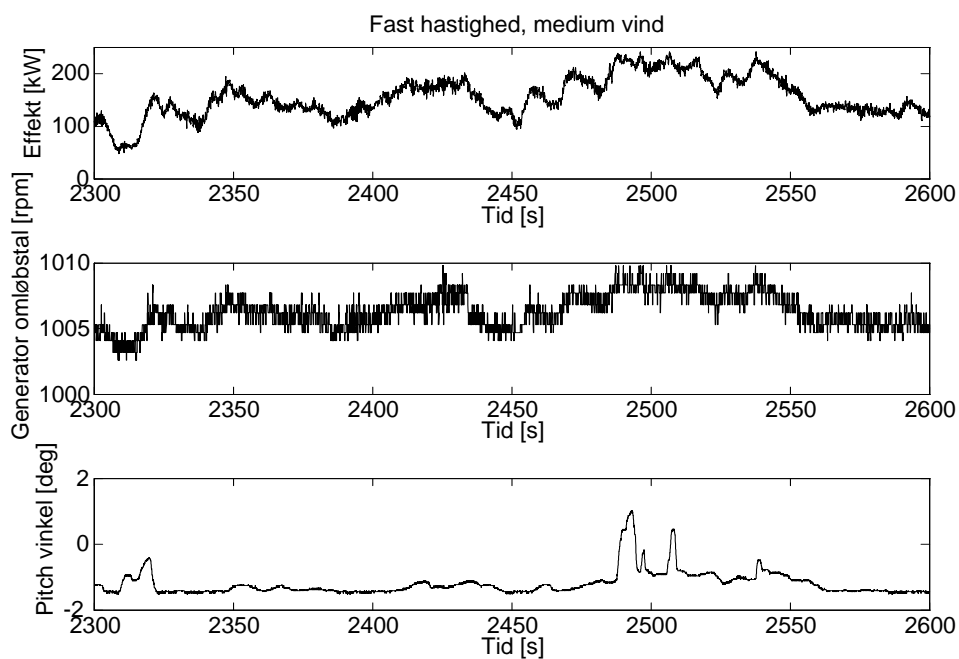
På figurerne 12 og 13 ses hvordan effekten, omløbstallet og pitchvinklen for vindmøllen ser ud ved lave vindhastigheder. For effekten ses, at når der køres



Figur 12. Tidsspor af drift ved lav vindhastighed og fast omløbstal

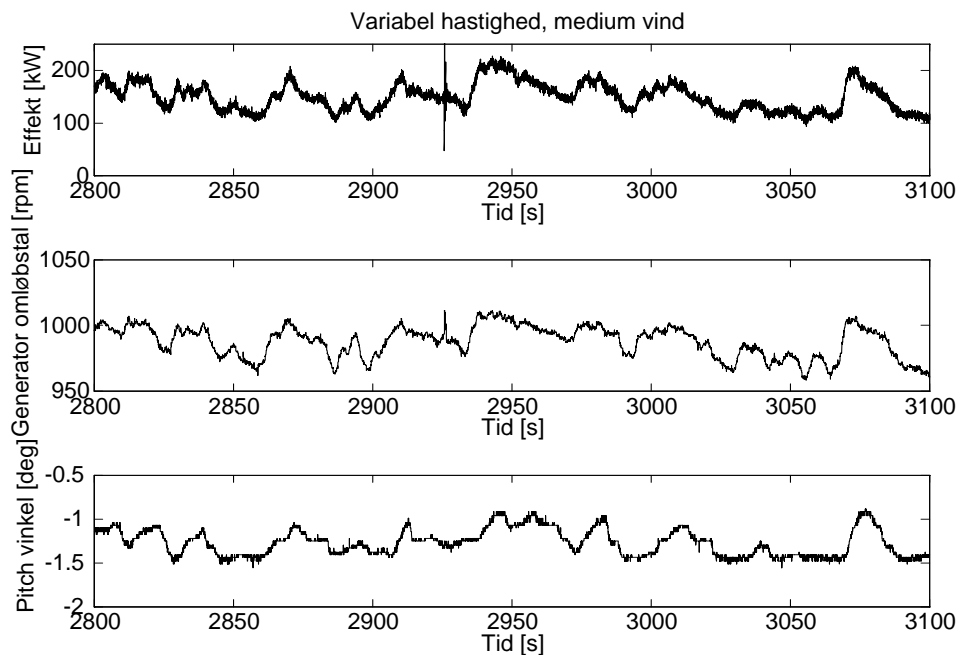


Figur 13. Tidsspor af drift ved lav vindhastighed og variabelt omløbstal

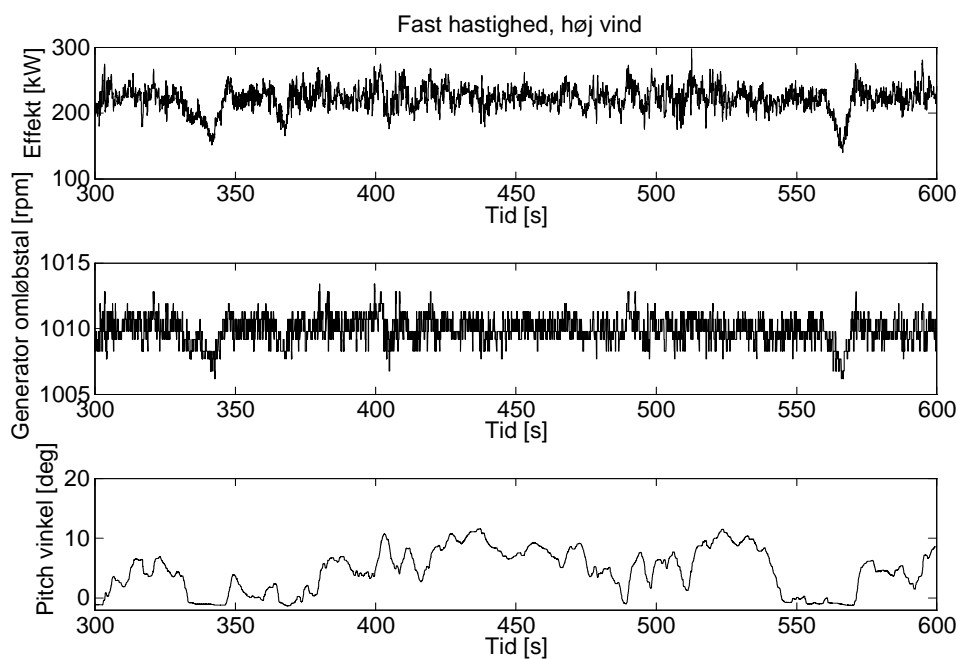


Figur 14. Tidsspor af drift ved mellem vindhastighed og fast omløbstal

med variabelt omløbstal så elimineres nogle fluktuationer, idet kurven bliver en anelse blødere. Der er imidlertid nogle mere højfrekvente svingninger. Det ses at omløbstallet varierer kraftigt ved frekvensomformerdrift. Evnen til at køre med variabelt omløbstal udnyttes derfor fint. De kraftige og kortvarige effektfluktuationer, der ses ved frekvensomformerdrift, kan skyldes at frekvensomformerer ændrer skiftemønstret for GTO-kontakterne.

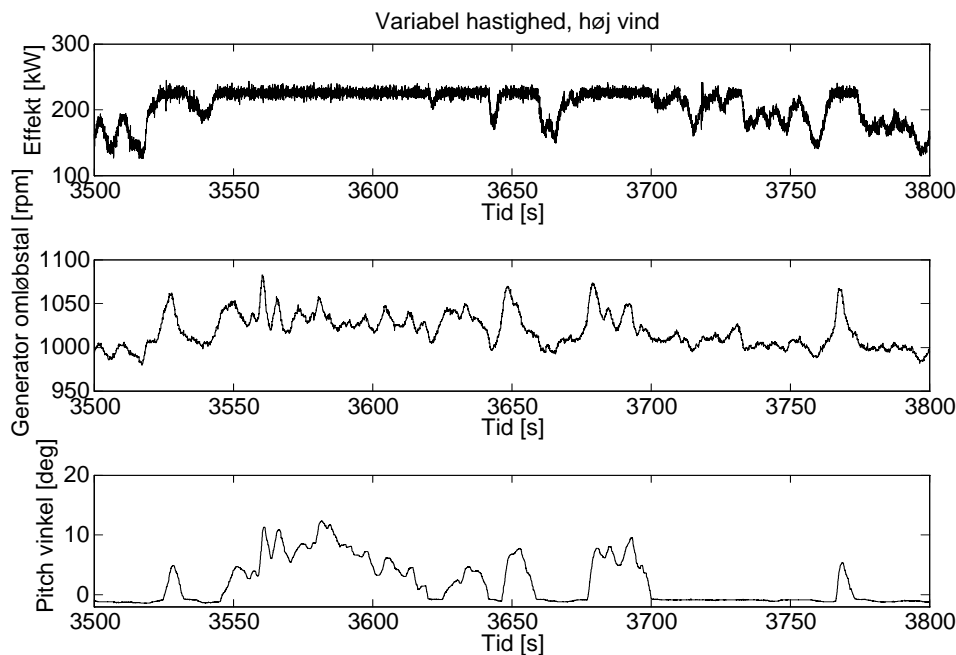


Figur 15. Tidsspor af drift ved mellem vindhastighed og variabelt omløbstal



Figur 16. Tidsspor af drift ved høj vindhastighed og fast omløbstal

På figurene 14 og 15 er vist den tilsvarende situation ved mellem vind. Ved sammenligning med tidssporene ved lav vind ses det, at der ved mellem-vind ikke er den store forskel på de to effekt-tidsspor udover at der ved frekvensomformerdrift er et noget højere højfrekvent indhold. Det ses også at omløbstallet har et øget indhold af højfrekvente variationer.



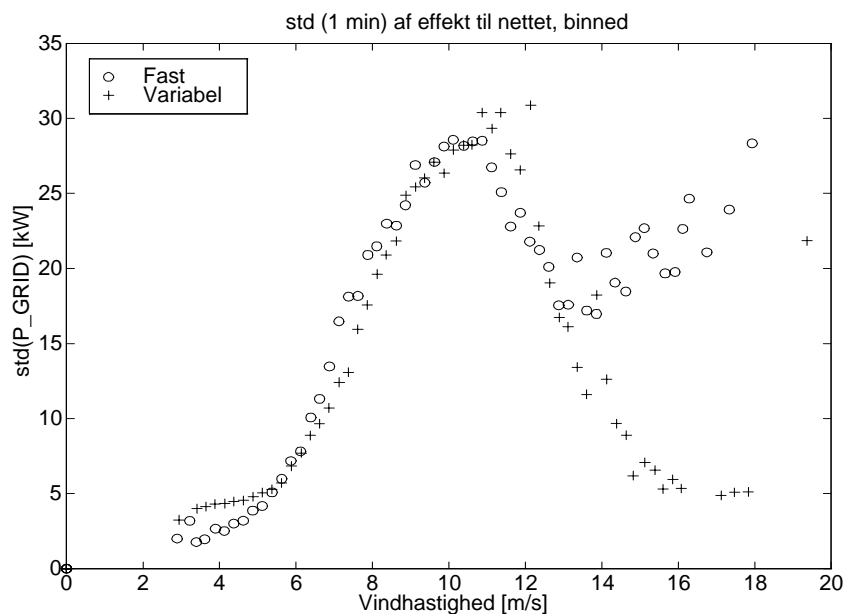
Figur 17. Tidsspor af drift ved høj vindhastighed og variabelt omløbstal

På figurerne 16 og 17 er vist hvordan vindmøllen effektbegrænser samt klarer overgangen fra effektoptimering til effektbegrænsning. Der er i denne situation meget stor forskel på hvordan systemet opfører sig. Når effektbegrænsningen sker ved pitchregulering alene kan man se effektfluktuationerne er væsentlig større end når vindmøllen kører med frekvensomformeren. Udgangseffekten fra vindmøllen reguleres inden for få kilowatt i effektbegrænsning ved frekvensomformerdrift. De resterende fluktuationer er af ganske højfrekvens. Det ses også tydeligt hvordan omløbstallet varierer og dermed hvordan rotorinertien benyttes som korttidslager. Sammenlignes pitchsignalerne i de to driftsituationer ved høj vind ses det der er et større indhold af højfrekvente variationer når vindmøllen er i normaldrift. Det ser således ud til at pitchsystemet skal regulere mere når vindmøllen er i almindelig drift end når den er i frekvensomformerdrift. Det er som forventet idet frekvensomformerer regulerer effekten til nettet som er det kritiske signal. Pitchservoen skal i denne driftsituation blot sørge for at begrænse omløbshastigheden. Dette er ikke lige så kritisk derfor behøver pitchservoen ikke at blive presset lige så hårdt. Når vindmøllen er i frekvensomformerdrift kan man se eksempler på nogle ganske store dyk i effekten, når der skiftes fra effektbegrænsning til effektoptimering. En del af disse dyk er karakteriseret ved at de er forholdsvis store (ca 100kW) samt at de har en kort varighed. Det vil være ønskeligt om en del af disse kunne undgås ved at udnytte rotationsenergien i rotoren endnu mere. I det hele taget er overgangen fra begrænsning til optimering kritisk mht. fluktuationer og laster som det fremgår senere i afsnittet.

5.2 Elkvalitet

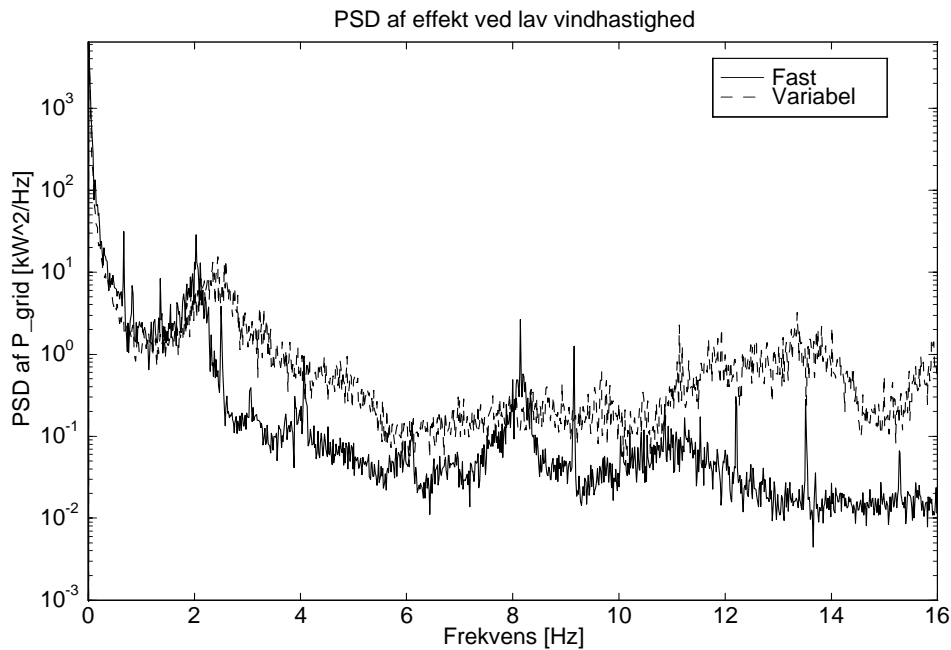
Elkvaliteten bedømmes på evnen til at begrænse effekten, på fluktuationerne i aktiv og reaktiv effekt samt på flicker. Først undersøges effektfluktuationer baseret på 1 min statistik. Der er her anvendt standardafvigelsen på effektsignalet som mål. På Figur 18 ses hvordan standardafvigelsen på effekten er i de to drift situationer. Det ses meget tydeligt på kurven hvordan

effektfluktuationerne ved høje vindhastigheder bliver reduceret kraftigt når der anvendes frekvensomformerdrift. Reduktionen er på op til fire gange. Det bemærkes også at niveauet er nærmest konstant, hvorimod det ved fast omløbstal stiger med vindhastigheden som forventet. Det er altså er klar fordel ved frekvensomformerdrift. I forløbet fra 2 til 10 m/s er der ikke den store forskel på de to driftformer hvad angår effektfluktuationer. Fra 7 til 9 m/s ligger frekvensomfordrift igen lidt under almindelig drift og ved helt lave vindhastigheder er det omvendt. Det ser ud som om at der er et bundniveau for effektfluktuationerne ved frekvensomformer drift man ikke kan komme under. Det bemærkes, at der ved overgangen fra effektoptimering til effektbegrænsning er et lidt større fluktationsniveau ved frekvensomformerdrift. En væsentlig grund til dette er de ovenfor nævnte kraftige effektændringer som følge af det meget skarpe knæk på den karakteristik der styres efter, nemlig den karakteristik der angiver sammenhængen mellem effektreference og omløbstal.

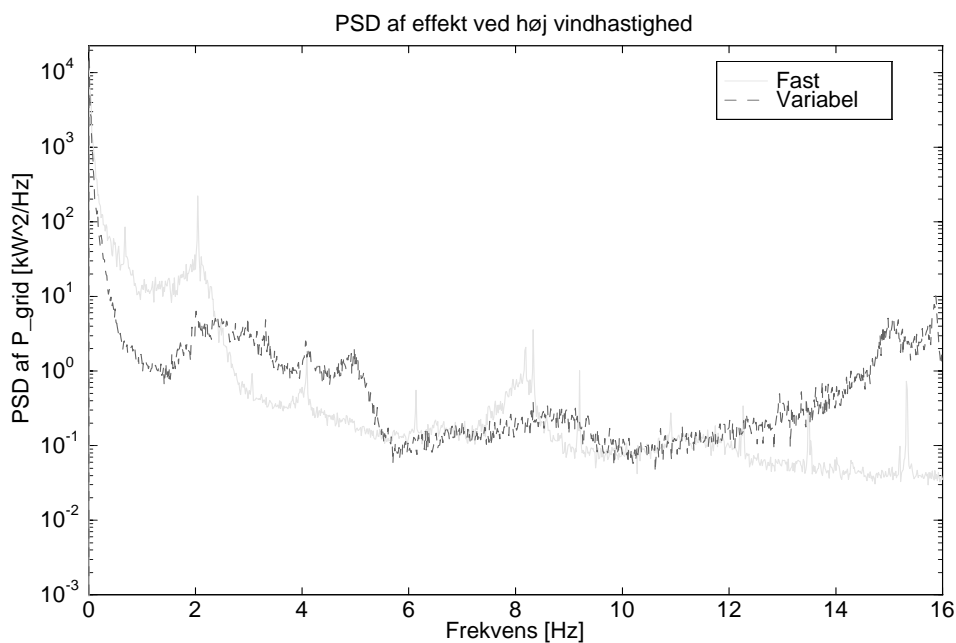


Figur 18. Standardafvigelse af effekt som funktion af vindhastighed

I Figur 19 og Figur 20 ses psd af effekten til nettet ved lav hhv. høj vind i de to driftformer. Frekvensspektret for drift med fast omløbstal er præget af nogle markante spidser. Her ses blandt andet, startende fra lave frekvenser, 1p der optræder pga. asymmetri på rotoren. Herefter følger tårnets 1. egenfrekvens. Der er en meget markant spids ved 2 Hz. Den skyldes både turbulens, tårnskygge ol. og vingernes symmetriske flapvise udbøjning. Ved ca. 3 Hz og ca 4 Hz ses igen markante spidser. Den sidste kan være vingernes kantvise udbøjning. Den mest markante spids ved højere frekvenser er en ganske høj og bred spids omkring 8 Hz. Den nøjagtige kilde til denne spids er ikke bestemt men opstår i generatoren, se senere. De bemærkes især, at ved frekvensomformerdrift elimineres en meget stor del af de skarpe frekvensspidser. Frekvensomformeren kan således udglatte variationer fra asymmetrier (1p) og tårnegnenfrekvens tillige med at variationerne ved 3p reduceres ganske betydeligt ved højevindhastigheder. Der sker også en omfordeling af effektfluktuationerne således at de ved lave frekvenser op til 3p dæmpes ved frekvensomformerdrift hvorimod de ligger på et højere eller samme



Figur 19. PSD af effekt til nettet ved lav vindhastighed

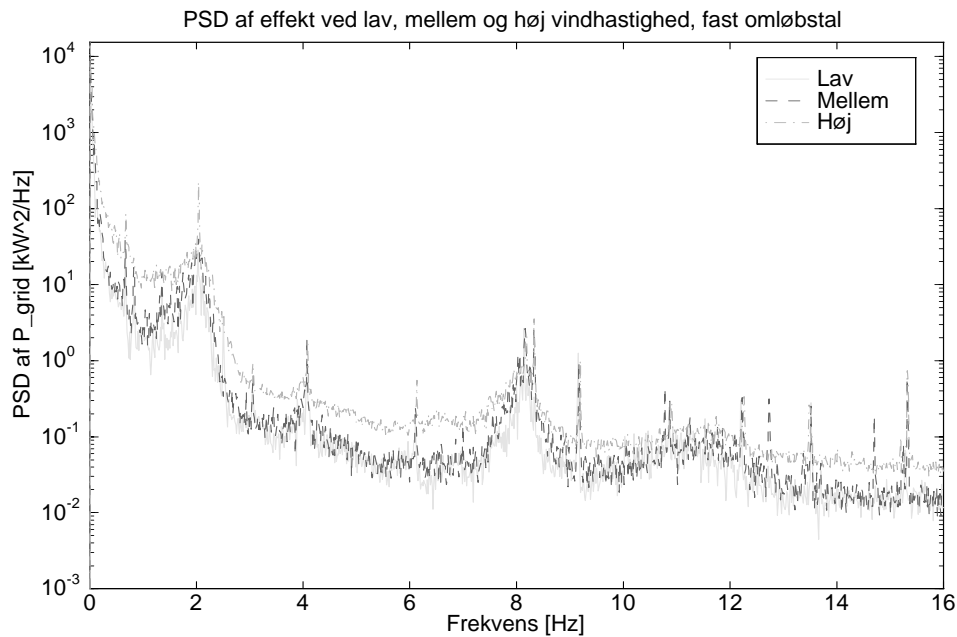


Figur 20. PSD af effekt til nettet ved høj vindhastighed. Fast omløbstal: fuld; Variabelt: stippet.

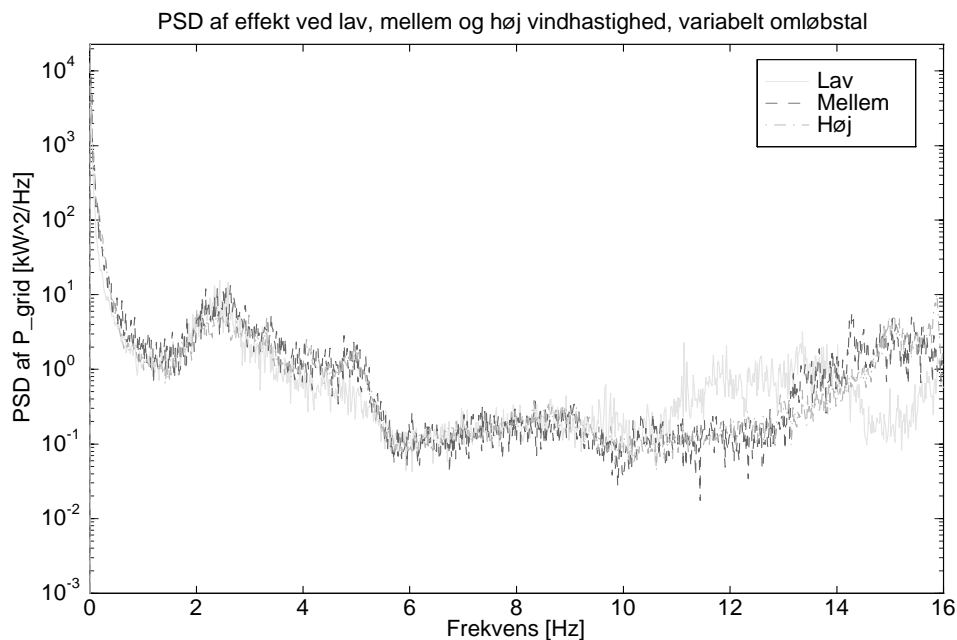
niveau i stort set resten af frekvensområdet. Ved lave vindhastigheder er niveauet ved frekvensomformerdrift betydeligt højere fra ca. 2 Hz og op. Det ses også på figur 20 at forbedringen er markant ved høj vind i området op til 2 Hz.

Man kan se på figurerne 21 og 22 hvordan spektrene ændrer sig når vinden øges. Det er især værd at bemærke at niveauet stort set ikke ændrer

sig ved frekvensomformerdrift, hvorimod det stiger ved almindelig drift. Højfrekvensforløbet ændrer sig en del ved frekvensomformerdrift idet man får en kraftig stigning fra ca. 13 Hz ved høj vind. Igen bemærkes det, at der stor set ikke er nogen frekvensspidser ved frekvensomformerdrift.

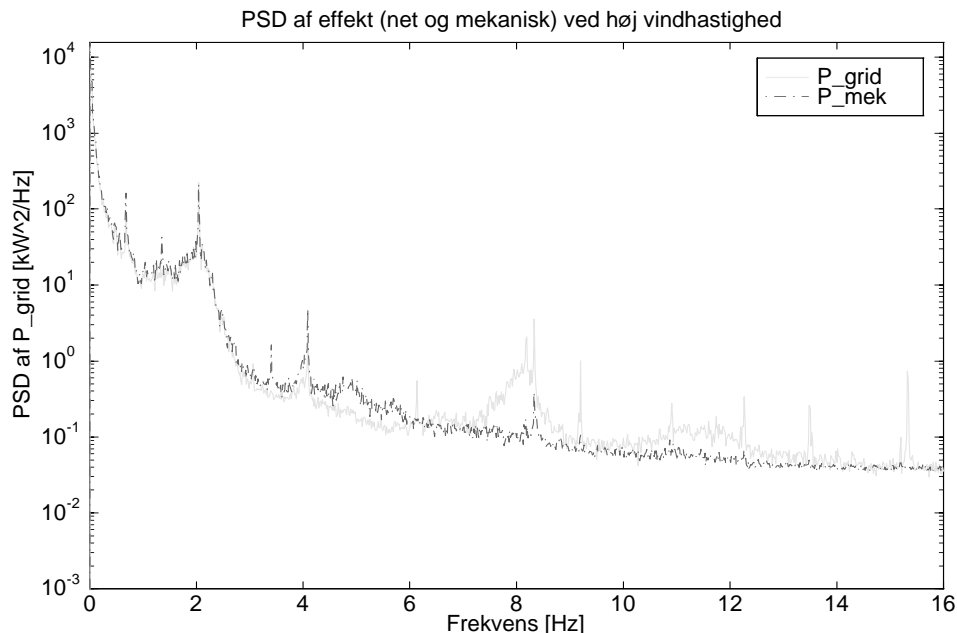


Figur 21. PSD af effekt til nettet ved lav, mellem og høj vindhastighed og fast omløbstal



Figur 22. PSD af effekt til nettet ved lav, mellem og høj vindhastighed og variabelt omløbstal

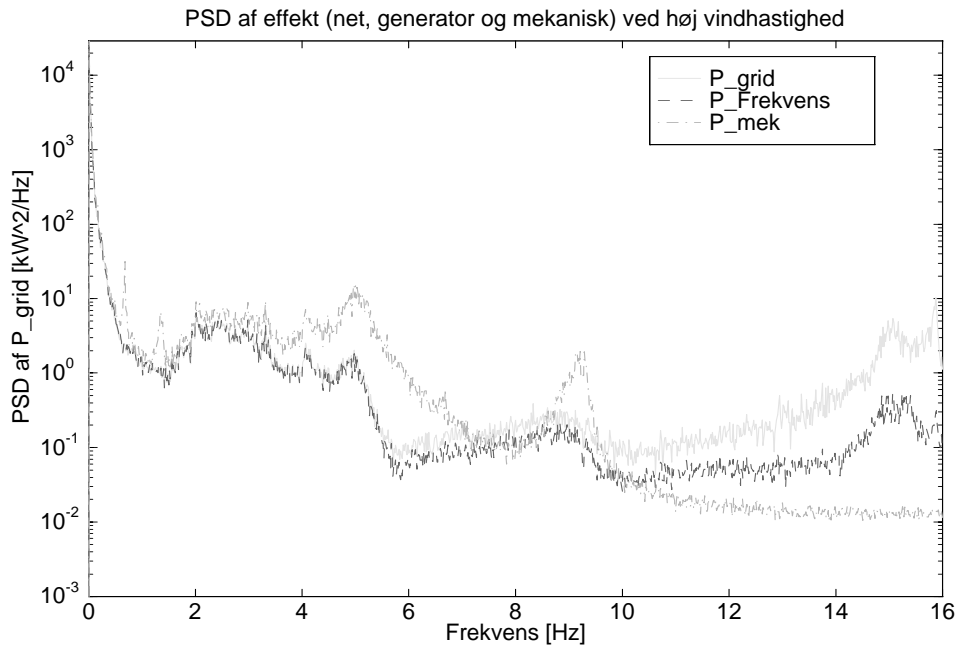
På de to næste figurer 23 og 24, ses hvordan spektret af den mekaniske effekt på hovedakslen bliver ændret gennem transmissionssystemet. På Figur 23 ses situationen med fast omløbstal. Det ses hvordan den elektriske effekt følger den mekaniske op til 3 Hz. Herefter dæmper asynkrongeneratoren effektfluktuationerne i et bånd frem til 6 Hz. Ved 8 Hz ses at den brede spids kun optræder i effekten til nettet. I den mekaniske effekt optræder kun 12p. Spidsen må derfor have sin oprindelse på den elektriske side i generatoren.



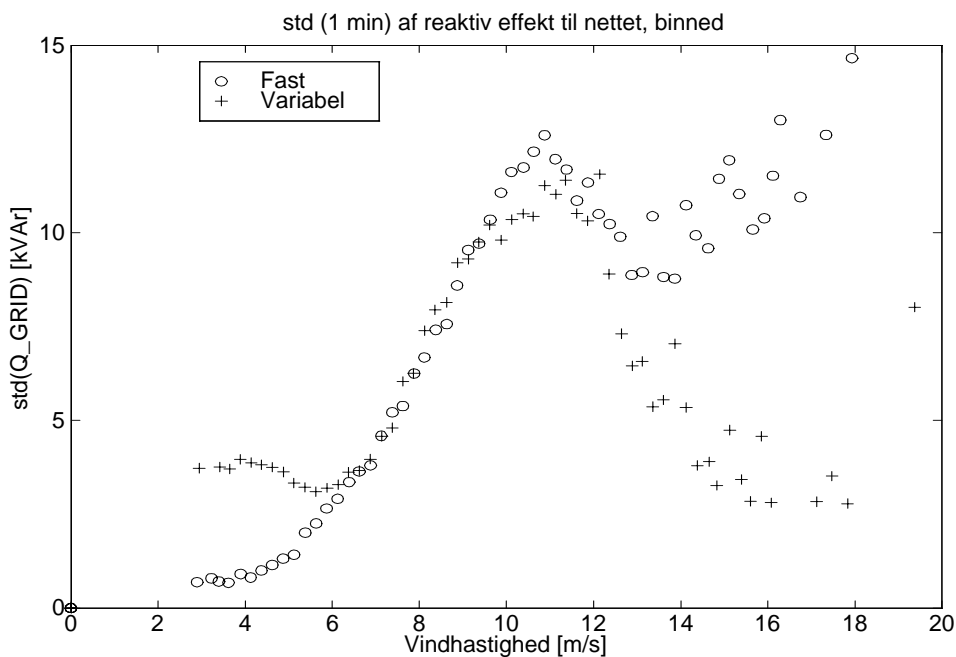
Figur 23. PSD af effekt til nettet og mekanisk effekt ved høj vindhastighed. Net omløbstal: fuld; Mekanisk: stipleet.

Når vindmøllen er forbundet nettet via frekvensomformeren er situationen noget anderledes, se Figur 24. 1p og en spids ved 1.5 Hz i den mekaniske effekt er elimineret i den elektriske effekt. 3p-spidsen er ikke særlig markant hverken i den mekaniske eller den elektriske effekt. Derimod optræder nogle meget markante spidser ved 5 Hz og 8 Hz. Begge disse er reguleret ganske godt ud i den elektriske effekt. De må begge stamme fra egenfrekvenser i transmissionssystemet. Herudover bemærkes især stigningen ved høje frekvenser i generatoreffekten og især i effekten til nettet. Det er den samme stigning der ses på Figur 20. Man kan på Figur 22 se at en stor del af stigningen foregår i frekvensomformeren. Det ser ud til at der er en resonans i frekvensomformeren i dette område, når effekten er høj.

Ud fra en strømkvalitets betragtning er reguleringen af reaktiv effekt også meget vigtig. På Figur 25 ses standardafvigelsen af den reaktive effekt baseret på 1 min statistik. Forløbet ligner det tilsvarende forløb for effekten, dog med noget større (relativt) fluktuationer ved lave vindhastigheder. Ved høje vindhastigheder er fluktuationerne igen meget mindre end i den tilsvarende situation med fast omløbstal. De noget større fluktuationer i den reaktive effekt indikerer sammen med den tidligere viste figur med den reaktive effekt afbildet som funktion af den aktive effekt, Figur 5, at frekvensomformeren har problemer med at styre den reaktive effekt.



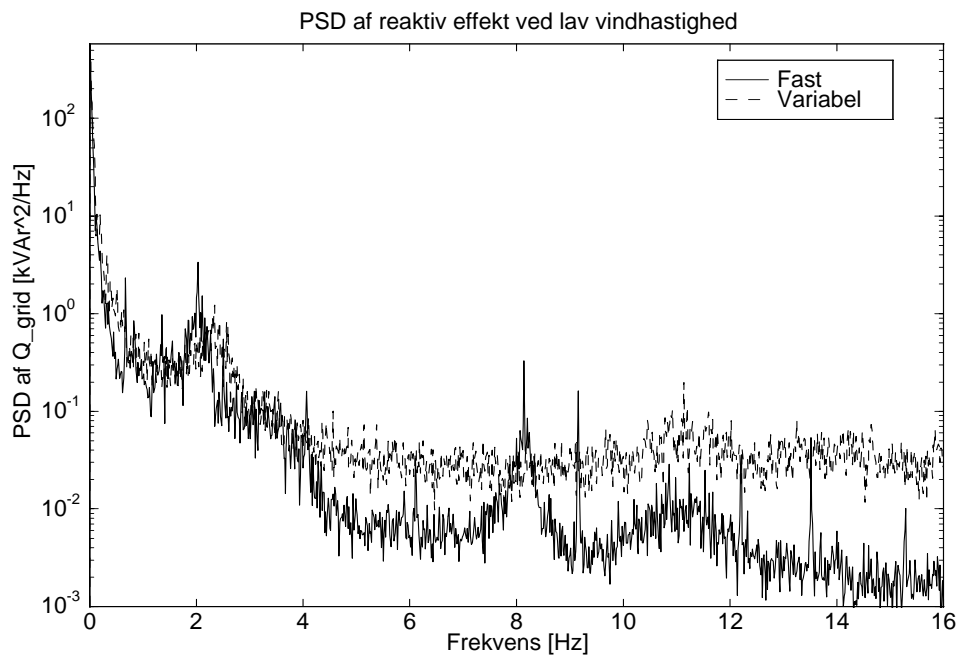
Figur 24. PSD af effekt til nettet, på generatorklemmerne og mekanisk ved høj vindhastighed. Net: fuld; Generator: brudt; Mekanisk: stiplet.



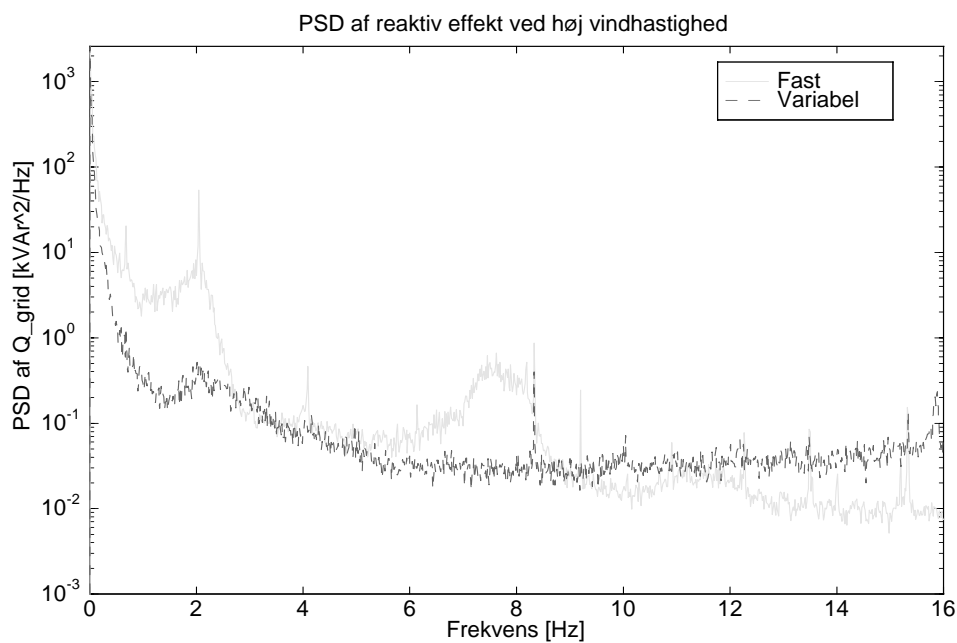
Figur 25. Standardafvigelse af reaktiv effekt som funktion af vindhastighed

Den spektrale fordeling af fluktuationerne fremgår af figurerne 26 og 27 ved lave hhv. høje vindhastigheder. Man kan her se at ved lav vind er niveauet lavere når vindmøllen er i almindelig drift. Der er dog et lavere indhold af deciderede frekvensspidser. Ved høj vind er forholdet helt anderledes. Der er stort set det samme niveau for frekvensomformerdrift ved de to vindhastigheder derimod stiger niveauet ganske kraftigt ved fast omløbstal, der er derfor et meget lavere

fluktuationsniveau ved frekvensomformerdrift.



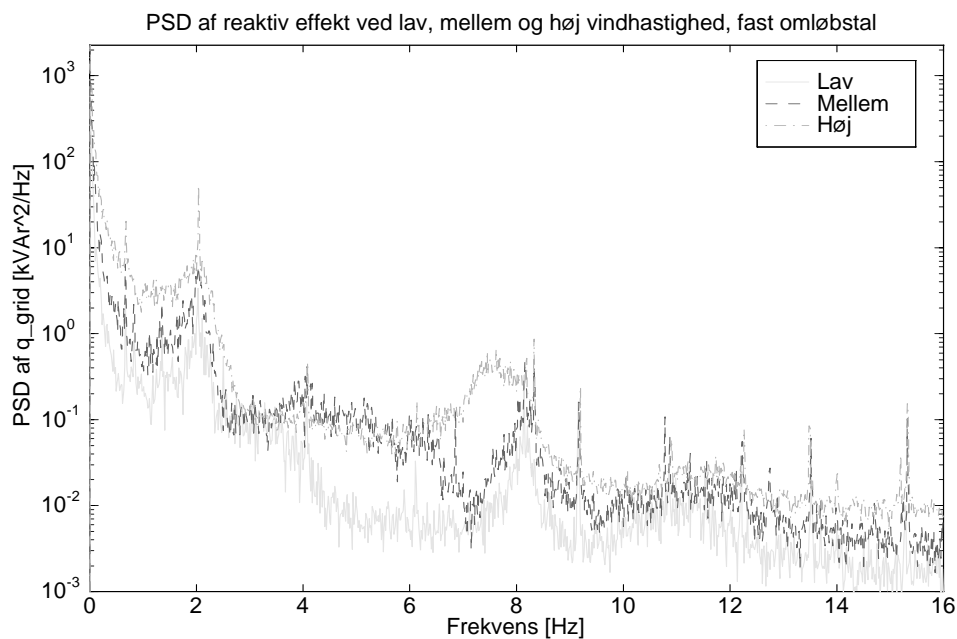
Figur 26. PSD af reaktiv effekt til nettet ved lav vindhastighed



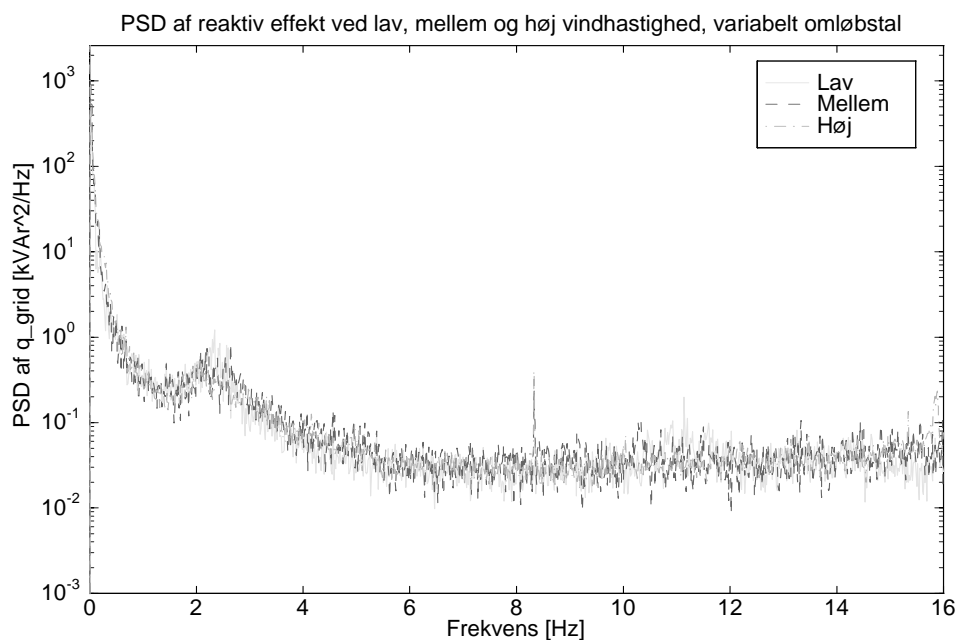
Figur 27. PSD af reaktiv effekt til nettet ved høj vindhastighed

Man kan se dette understreget på figurerne 28 og 29. De to figurer viser klart at niveauet stiger ved fastomløbstaldrift hvorimod det stort set er konstant ved

frekvensomformerdrift uafhængig af vindhastigheden. Det ses også at det stort set kun resonansen ved 2 Hz der ses, derudover er forløbet meget glat.



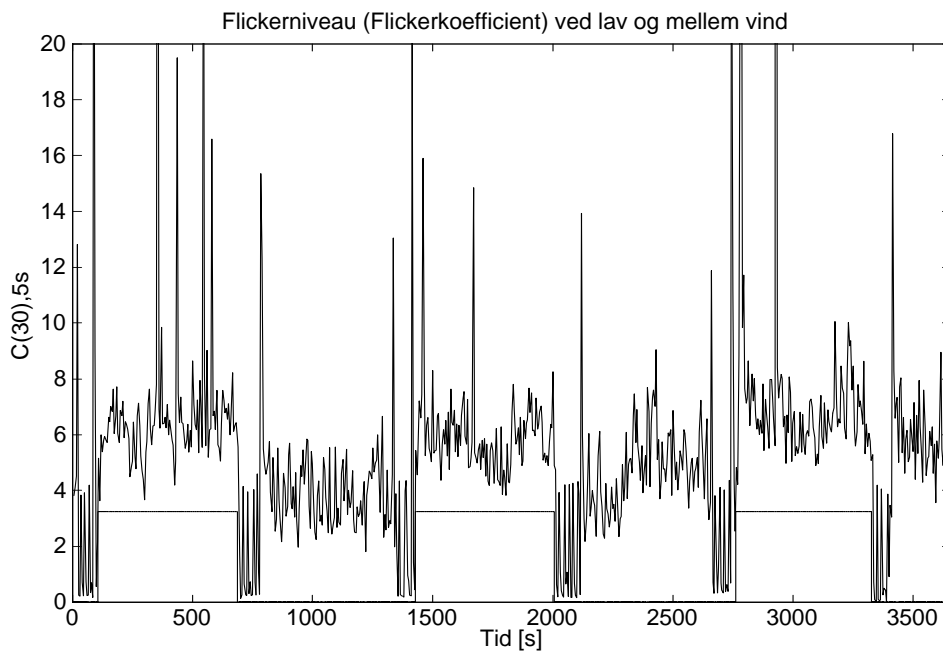
Figur 28. PSD af reaktiv effekt til nettet ved lav, mellem og høj vindhastighed og fast omløbstals



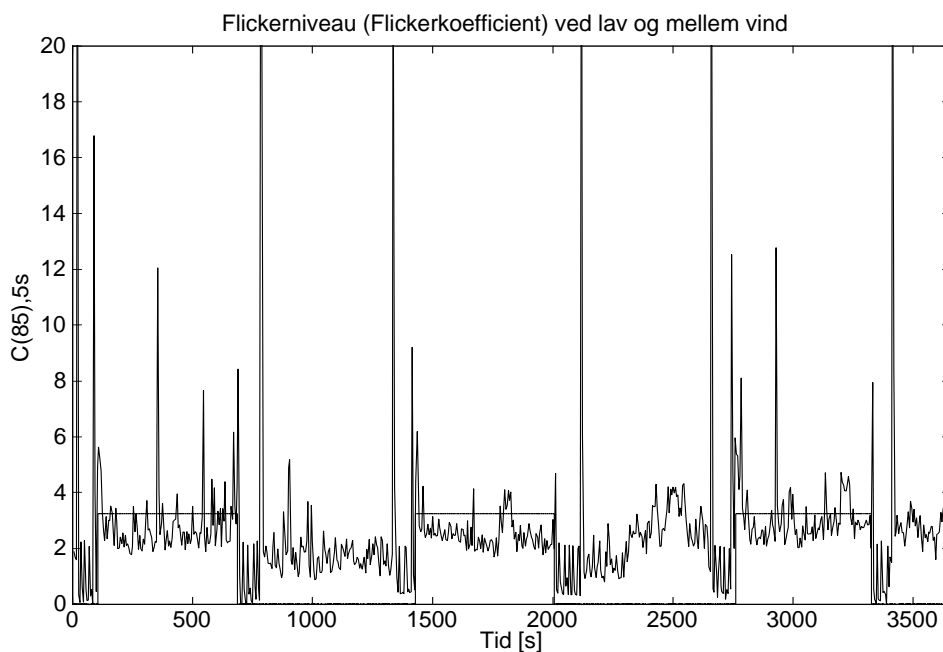
Figur 29. PSD af reaktive effekt til nettet ved lav, mellem og høj vindhastighed og variabelt omløbstal

På figurerne 30-33 er flickerkoefficienten for de to tidsserier. Den er her beregnet

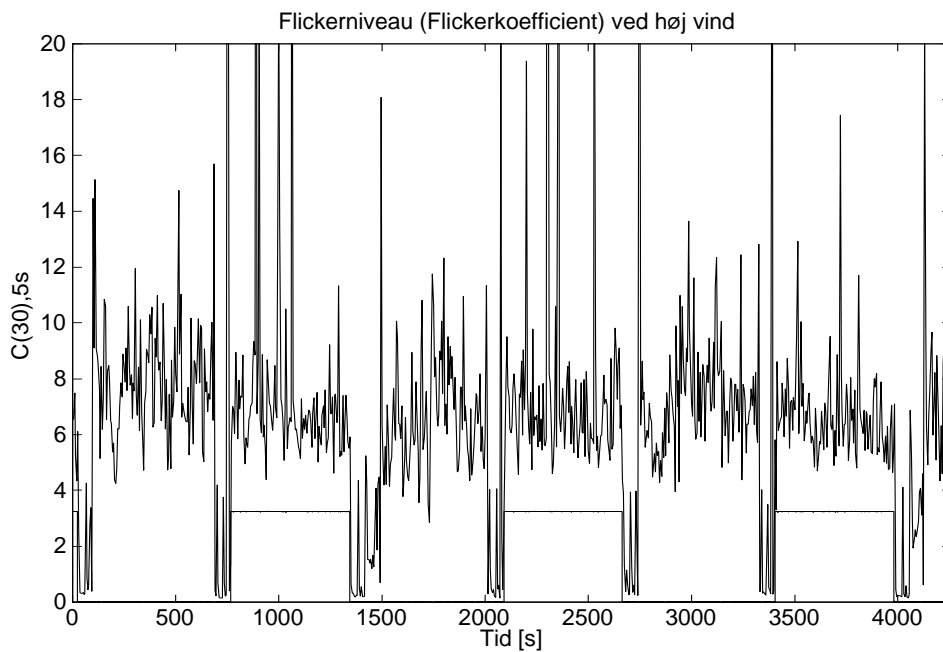
som en 5 s flickerkoefficient for at man kan se hvad der bidrager til flickerniveauet i de to driftsituationer. Flickerkoefficienten er beregnet og vist ved to netvinkler 30° og 85°.



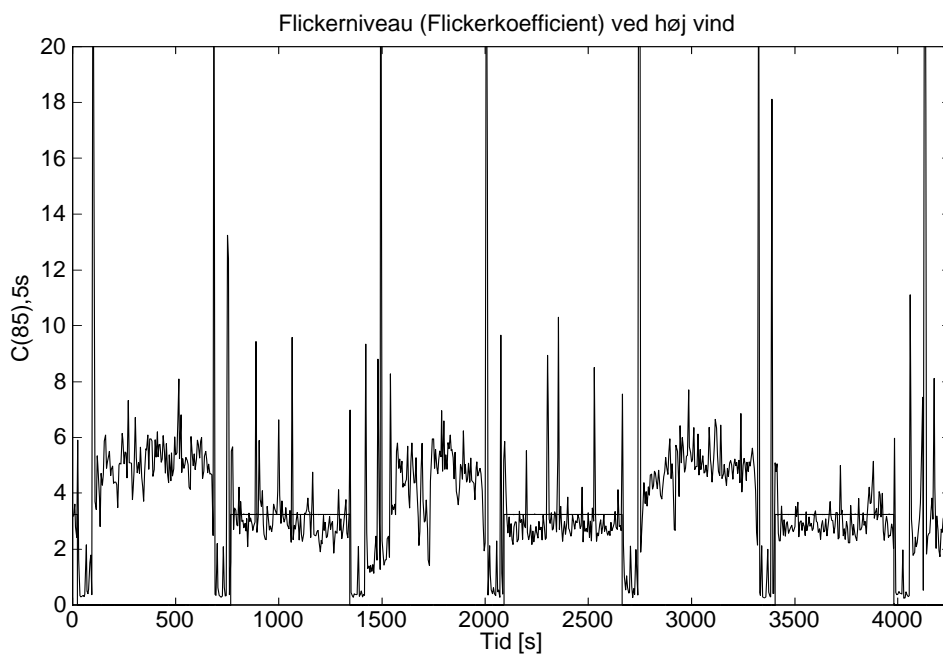
Figur 30. Flickerkoefficient ved lav og mellem vind og en netvinkel på 30 grad. Når firkantkurven er høj er vindmøllen i frekvensomformerdrift.



Figur 31. Flickerkoefficient ved lav og mellem vind og en netvinkel på 85 grad. Når firkantkurven er høj er vindmøllen i frekvensomformerdrift.



Figur 32. Flickerkoefficient ved høj vind og en netvinkel på 30 grad. Når firkantkurven er høj er vindmøllen i frekvensomformerdrift.



Figur 33. Flickerkoefficient ved høj vind og en netvinkel på 85 grad. Når firkantkurven er høj er vindmøllen i frekvensomformerdrift.

Der er flere ting der bemærkes. På figurerne med lav til mellem vind ses det at flickerniveauet generelt er højere ved frekvensomformerdrift samt at der udover spidser ved indkobling er nogle meget høje værdier når vindmøllen er i kontinuert frekvensomformerdrift. Ved sammenligning med tidssporene for bla. effekt til nettet kan det konstateres at der er en tidsmæssig sammenhæng mellem de høje flickerværdier og de i indledningen af dette afsnit nævnte kraftige kortvarige effektfluktuationer. Det generelt høje niveau kan skyldes at frekvensomformeren har et generelt højt støjniveau (aktiv og reaktiv effektfluktuationer) illustreret tidligere på diverse PSD-figurer samt at dette højere niveau især er i et frekvensområde hvor der er stor flickerfølsomhed. Denne forklaring underbygges når situationerne ved høj vind betragtes, se Figur 32 og Figur 33. Her ses at når netvinklen er 30° er niveauet i de to driftformer ganske ens, men dog stadig med nogle høje spidser ved frekvensomformerdrift. Når netvinklen er 85° der et klart lavere flickerniveau ved frekvensomformerdrift, stadig med undtagelse af de høje spidser.

Det høje flickerniveau er noget overraskende idet en af de potentielle fordele ved anvendelse af frekvensomformer er en bedre regulering af både aktiv og reaktiv effekt i et bredt frekvensområde. Det er også overraskende at den bedre effektbegrænsning, der faktisk er opnået, ikke slår endnu bedre igennem med lavere flickerværdier til følge.

5.3 Vinge- og tårnlaster

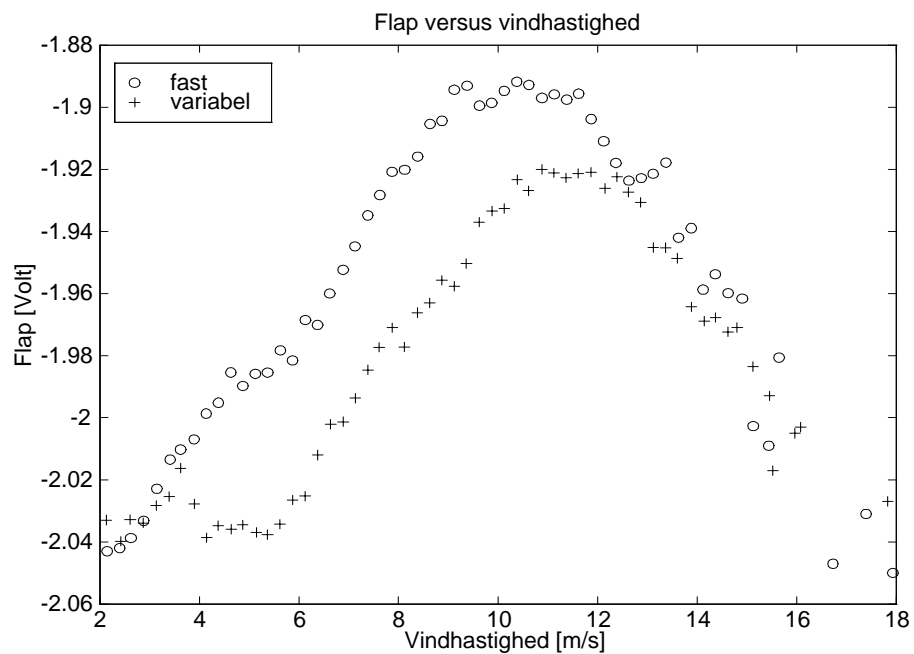
For at vurdere indflydelsen af variabel omløbstal drift på de strukturelle laster er undersøgt hvordan flap hhv kantvis udbøjning af vingerne som af tårnet ændres med driftformen. For flap og kant signalerne betragtes middelværdi hhv. standardafvigelse som funktion af vindhastighed samt PSD ved høj vind.

Det ses at middelflapudbøjningen er lavere i hele området fra 4 m/s til 12 m/s, hvorefter de to kurver følges ad (se Figur 34). For middelværdien af kantudbøjningen er det lige modsat (se Figur 35).

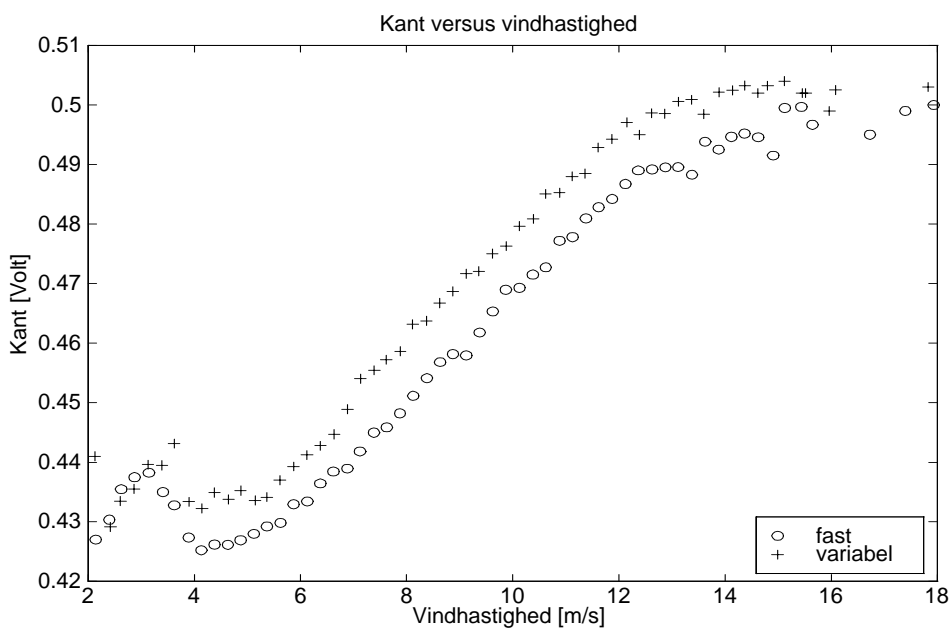
I Figur 36 ses standardafvigelsen for flapudbøjningen. Det ses at niveauet er det samme op til ca 12 m/s. Over 12 m/s er niveauet lidt højere når vindmøllen kører med variabelt omløbstal. Det kan skyldes det generelt højere niveau for flapudbøjningen som følge af de øgede tab i systemet. For kantudbøjningen, Figur 37, er niveauet lavere ved variabelt omløbstal drift op til ca 12 m/s. Herefter ser det ud til at niveauet er det samme i de to drifttilstande på trods af det højere omløbstal. Det kan skyldes den bedre regulering af momentet.

På spektrene af de to signaler Figur 38 og Figur 39 ses det at spidserne er reduceret, når vindmøllen er i frekvensomformerdrift samt at nogle af spidserne er helt elimineret. Herudover er forløbet meget ens i de to tilfælde.

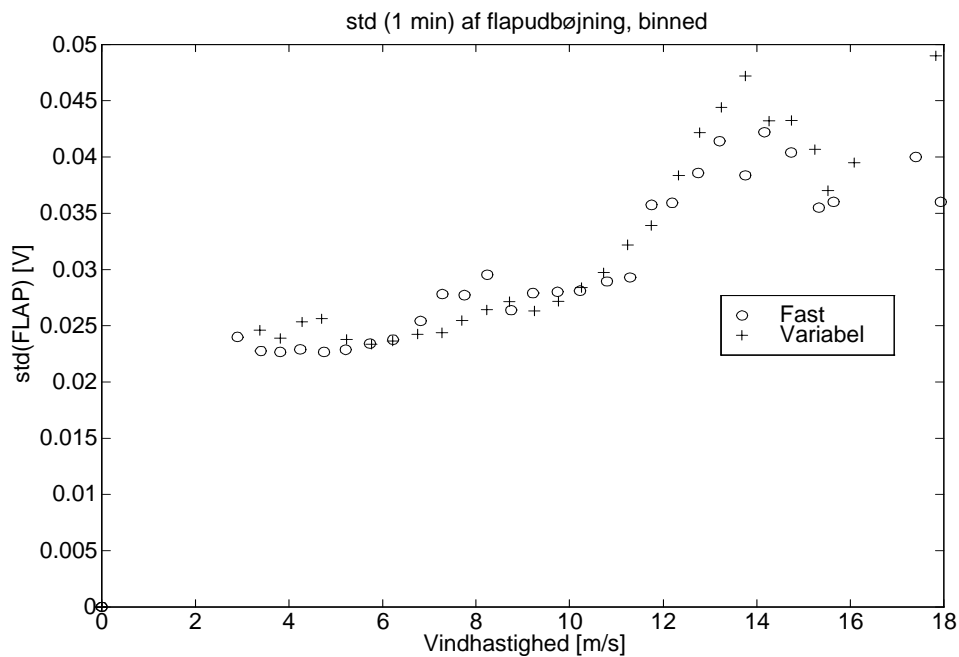
Drift med frekvensomformer påvirker således kun i lille grad belastningen på vingerne. Den eneste øgede belastning er en lidt øget variation for flapudbøjningen ved høje vindhastigheder. Derudover ser det ud til at belastningerne faktisk reduceres en smule, når vindmøllen er i frekvensomformerdrift.



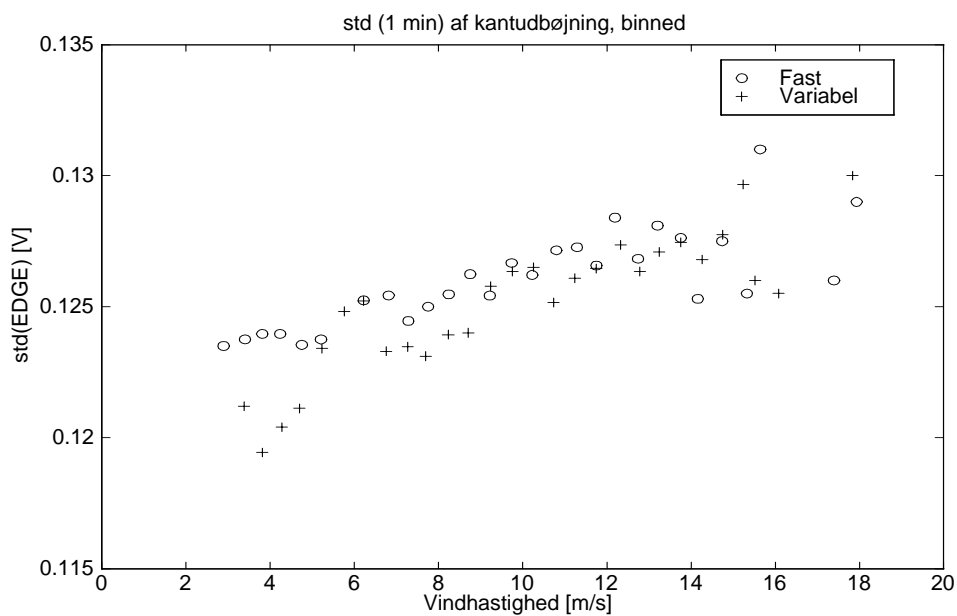
Figur 34. Flapudbøjning, binned værdier



Figur 35. Kantudbøjning, binned værdier



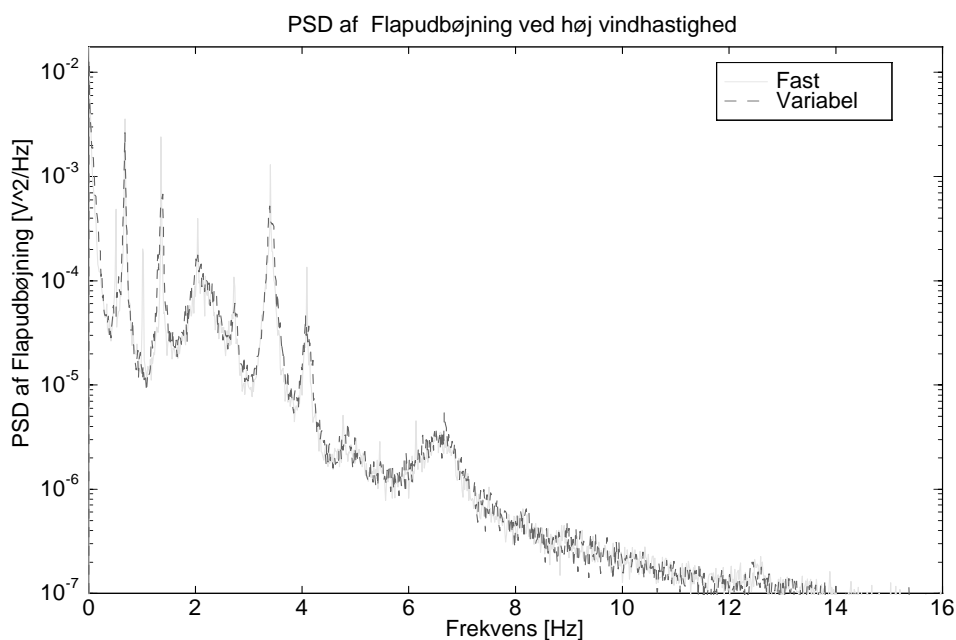
Figur 36. Standardafvigelse af flapudbøjning som funktion af vindhastighed



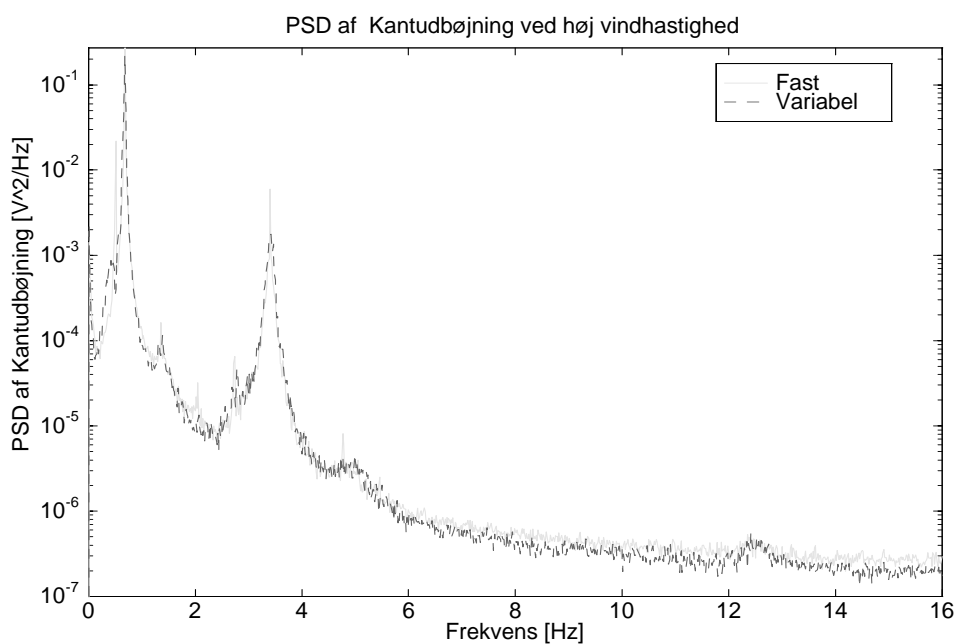
Figur 37. Standardafvigelse af kantudbøjning som funktion af vindhastighed

I Figur 40 ses tårnudsøjningen i retningerne i rotorplanet og vinkelret på rotorplanet. Som det ses er der ikke stor forskel på de to situationer.

Der er ved udformningen af reguleringsstrategien ikke gjort specielle tiltag for at reducere belastningerne på vingerne. Det primære mål har været at reducere effektfluktuationer og forbedre elkvaliteten.



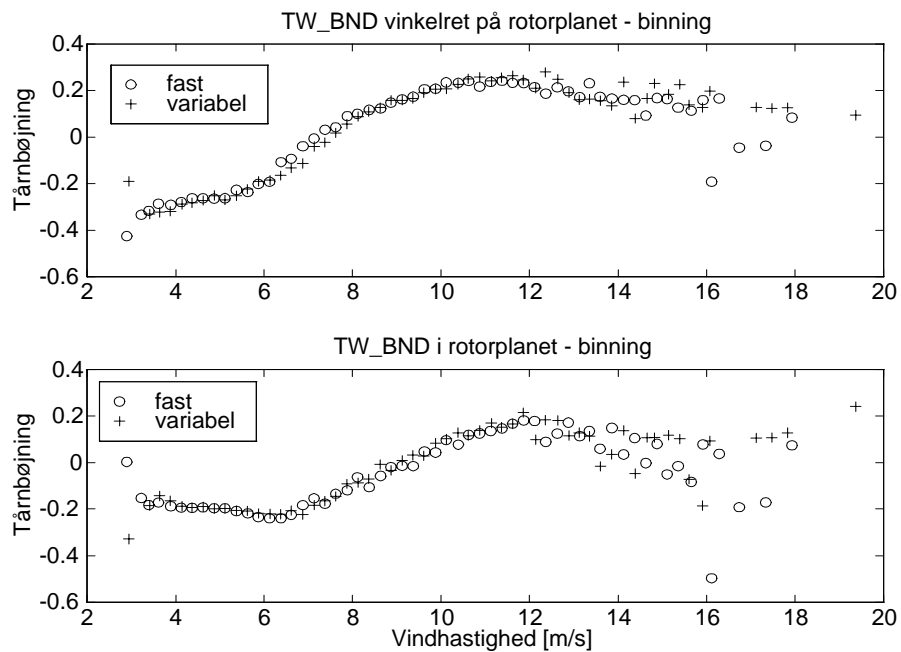
Figur 38. PSD af flapudbøjning ved høj vindhastighed



Figur 39. PSD af kantudbøjning ved høj vindhastighed

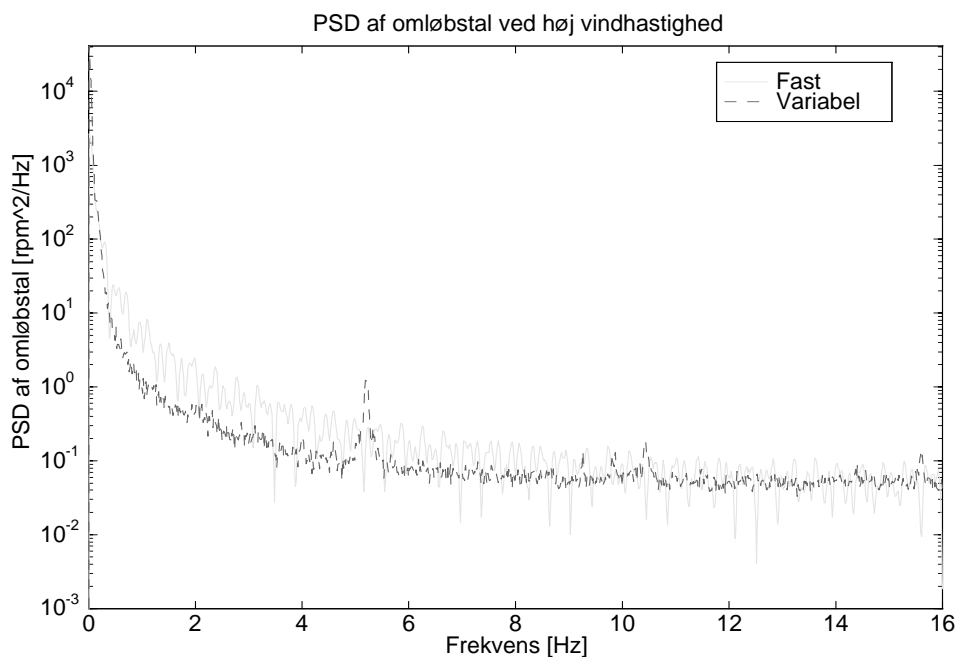
5.4 Øvrige laster

Indledningsvis undersøges hvordan forskellen er på generatoromløbstallet og hovedakselmomentet i de to driftformer. For omløbstallet ses at forskellen primært er for lave frekvenser, under 0.1 Hz, og at der ikke er andre egenfrekvenser end en ved 5.5 Hz, Figur 41. Der anes også andre egenfrekvenser i området 8-12



Figur 40. Tårnadbøjning i de to retninger som funktion af vindhastighed.

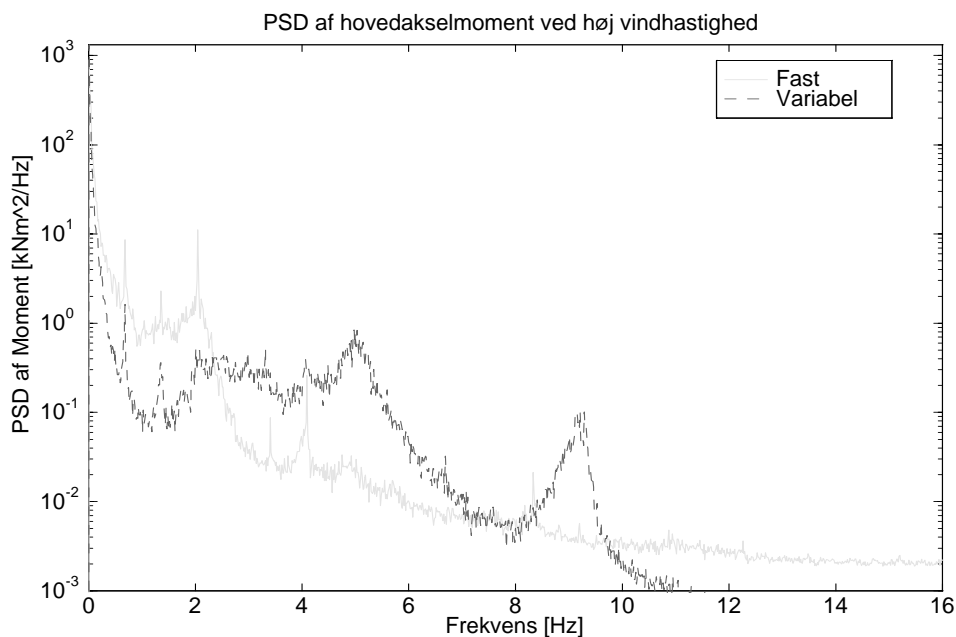
Hz. De er dog meget mindre.



Figur 41. PSD af generatoromløbstal ved høj vindhastighed og fast hhv. variabelt omløbstal

Der er nogle markante forskelle mellem forløbet af de to spektre af hovedakselmomenterne, Figur 42, i forhold til hvordan forløbet er for effekten. Som forventet ligner forløbet for situationen fastomløbstal meget den tilsvarende

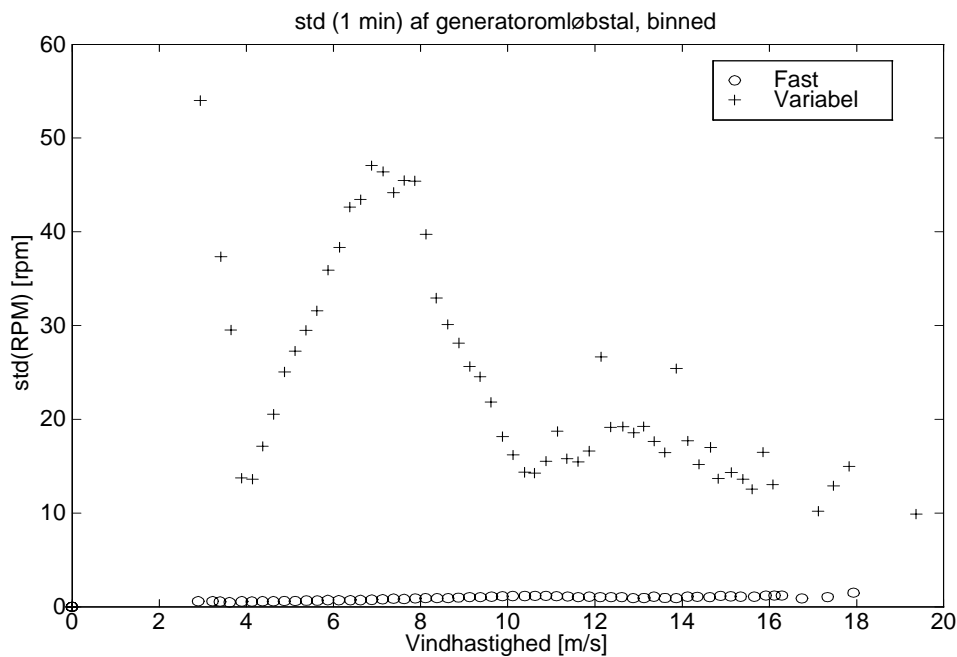
kurve med effekten til nettet. Der er dog den forskel at egenfrekvensen ved 8 Hz kun findes i effektsignalet. Den må derfor stamme fra generatoren evt. i samspil med den mekaniske del. Når vindmøllen er tilsluttet via frekvensomformerer ses to meget kraftige spidser ved ca 5 Hz og ca. 9 Hz. Det må være egenfrekvenser da der ikke er speciel excitation ved disse frekvenser. Egenfrekvensen ved ca. 5 Hz stammer fra transmissionssystemet. Det er samme frekvens, der ses i spektret for omløbstallet. Egenfrekvensen ses ikke så kraftigt i effektsignalet. Det bør undersøges om egenfrekvensen kan dæmpes. En del af forklaringen på stigningen i spektret for effekten til nettet er, at pga. resonansen ved 5 Hz vil der være en spids i referencesignalet til frekvensomformerer. Vindmøllens reguleringssystem har en 10 Hz sampling frekvens. Disse to ting tilsammen gør at 5 Hz indholdet i styresignalet bliver aliased op til 15 Hz, hvorved der fremkommer en stærk excitation af den resonans, der er ved denne frekvens i frekvensomformerer. Årsagen til resonansen ved 9 Hz er ikke nærmere undersøgt. Den må stamme fra egenfrekvens i det roterende system, da den ikke findes i de øvrige signaler.



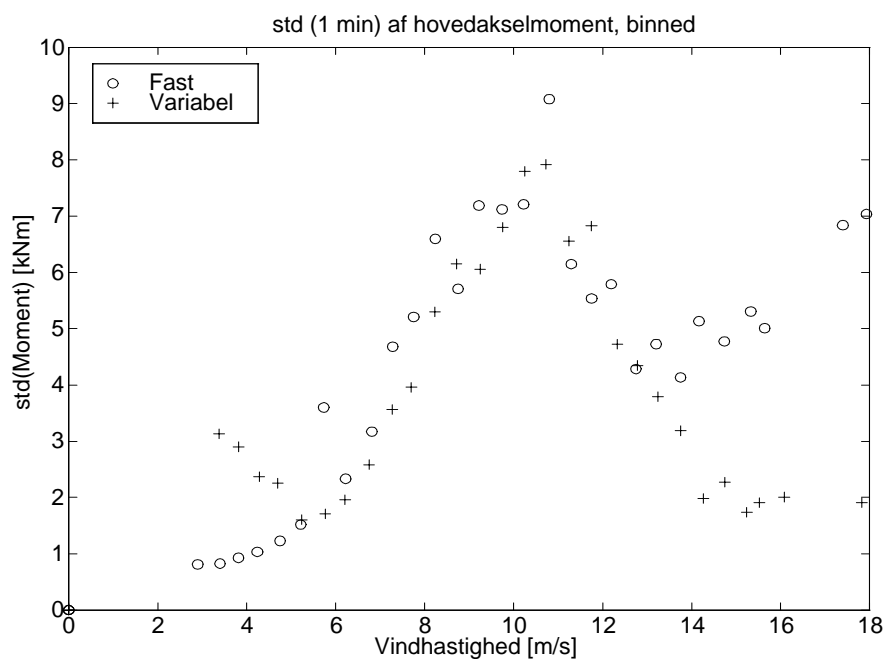
Figur 42. PSD af hovedakselmoment ved høj vindhastighed og fast hhv. variabelt omløbstal

Af Figur 43 ses at op til 7 m/s udnyttes muligheden for variabelt omløbstal til at følge ændringerne i vindhastigheden. Herefter bliver variationerne mindre indtil de når et forholdsvis lavt niveau når der effektbegrænses. I dette område er hastighedssløjfen aktiv og den vil derfor begrænse ændringerne i omløbstallet. Det ses dog at variationerne i omløbstal er mange gange større end når vindmøllen er direkte nettilsluttet. En del af variationene i vinden bliver derfor optaget som ændringer i den kinetiske energi lagret i inertien af rotoren.

Standardafvigelsen på hovedakselmomentet, Figur 44, når vindmøllen er i frekvensomformerdrift er mindre end eller lig med niveauet for vindmøllen i almindelig drift undtagen ved lave vindhastigheder. De er endog betydelig lavere når der effektbegrænses.



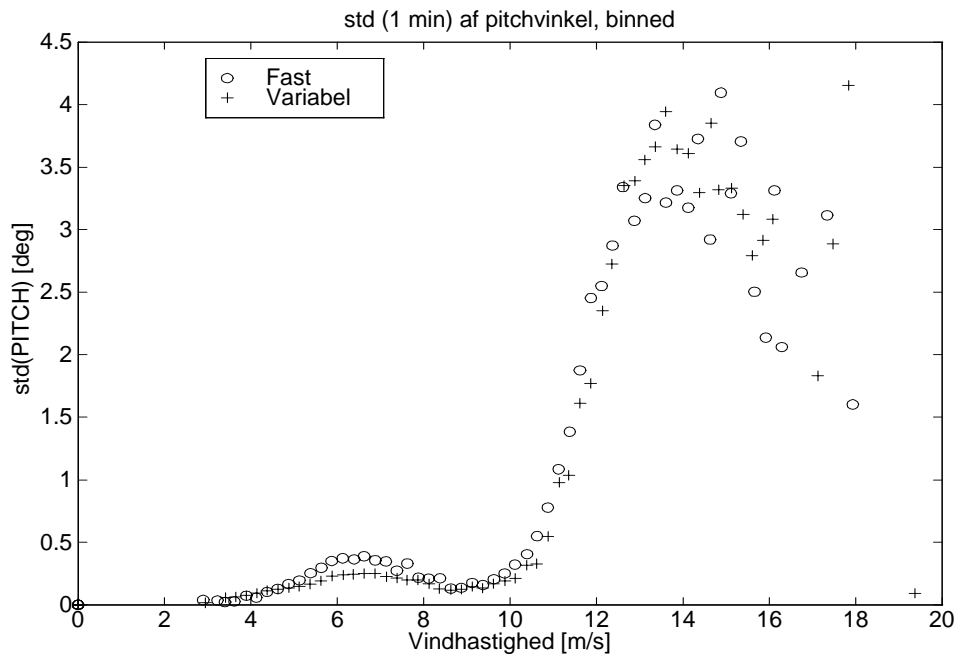
Figur 43. Standardafvigelse af generatoromløbshastighed som funktion af vindhastighed



Figur 44. Standardafvigelse af hovedakselmoment som funktion af vindhastighed

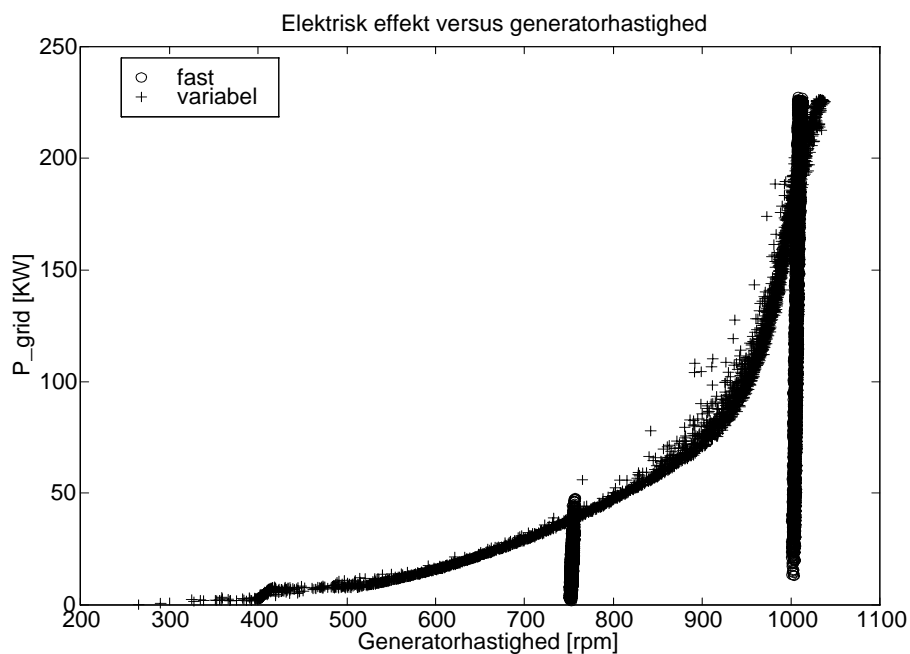
Variationerne i pitchvinkel er stort set upåvirket af om vindmøllen er i den ene eller anden driftsform. Som det fremgår af Figur 45 så er forløbet stort set ens, selv i overgangen til begrænsning ligger de på samme niveau.

Figur 46 viser hvordan sammenhængen er mellem effekt og omløbstal i de to driftstilstande. Det bemærkes at der er en meget lille spredning omkring

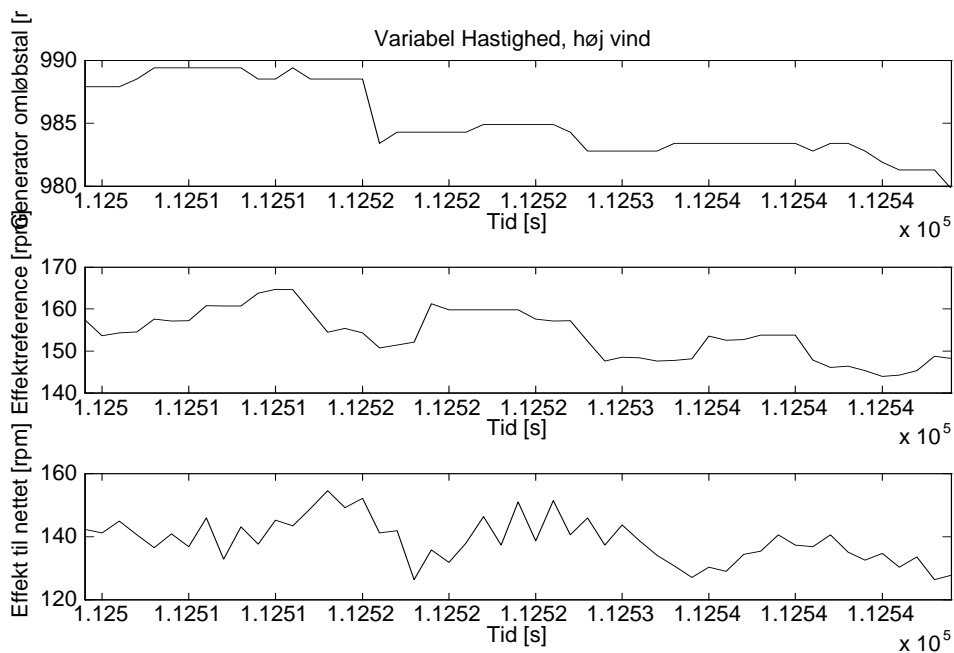


Figur 45. Standardafvigelse af pitchvinkel som funktion af vindhastighed

middelværdien af kurven i variabelt omløbstal situationen. Dette indikerer at reguleringssystemet ganske godt kan følge reference kurven. Reguleringsforløbet er vist nærmere på Figur 47. Her ses hvordan ændringer i omløbstallet straks ses i effekthereferencen til frekvensomformereren og at effekten til nettet kort tid efterfølger referencen.

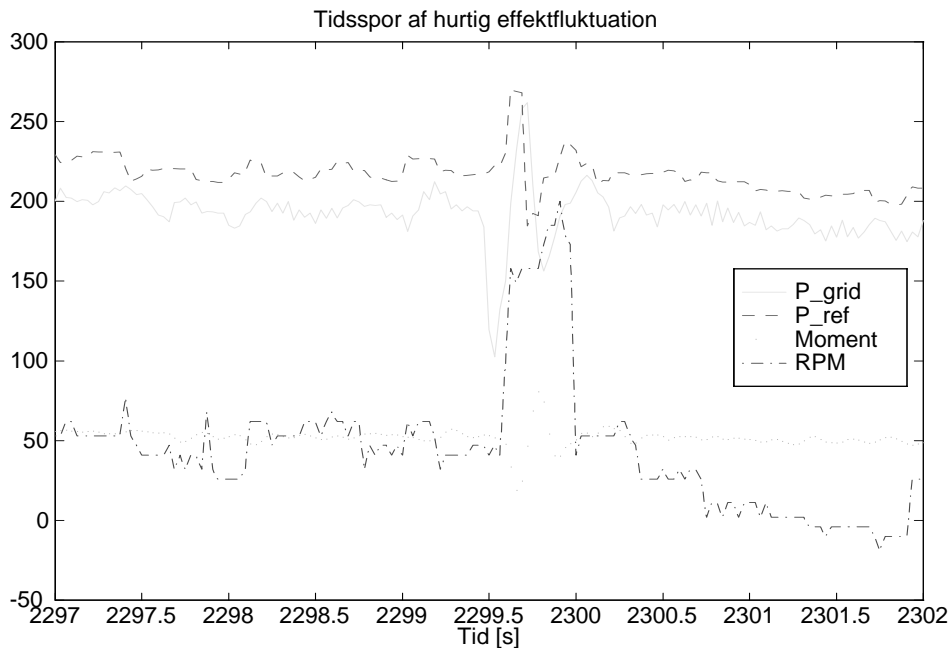


Figur 46. Effekt versus generatorhastigheden.



Figur 47. Sammenhæng mellem generator omløbstal, effekt reference og effekt til nettet

En del af de problemer der med elkvalitet og maximal effekt skyldes at frekvensomformerer genererer nogle meget kraftige effektfluktuationer. Disse fluktuationer optræder ved forskellige effektniveauer som det bla. kan ses på de figurer med tidsserier i starten af afsnittet, figurerne 12 til 17. For bedre at illustrere hvordan forløbet er under disse effektflutuationer kan må på Figur 48 se et udsnit af en tidsserie. Her vises effekten til nettet, referencen til frekvensomformerer, hovedakselmomentet og omløbstallet. Det ses tydeligt at først falder effekten til nettet meget voldsomt, herefter prøver effektregulatoren af udregulere dykket med en stor stigning i referencen til frekvensomformerer, der reagerer med øge effekten voldsomt, hvorefter fænomenet klinger ud. Det ser altså ikke umiddelbart ud til at der er en årsag i vindmølle systemet til det voldsomme udsving. Der er ikke fundet en endelig forklaring på fænomenet, men det kan ligge i styringen af netsiden af frekvensomformerer. Det er som tidligere nævnt disse forløb, der giver nogle meget høje flickerværdier.



Figur 48. Effektfluktuation forårsaget af frekvensomformer

6 Erfaringer

Der er opnået en række erfaringer med hensyn til kombinationen af variabel pitch og variabelt omløbstal. Der var en række forventninger til konceptet herunder især øget effektproduktion, bedre reguleringskvalitet, bedre strømkvalitet og mindre laster på vindmøllen.

Der er som ovenfor vist ingen øget effektproduktion når vindmøllen er i variabeltomløbstaldrift i forhold til når den er i normal drift. Der er tværtimod en noget mindre produktion. Dette skyldes primært øgede tab i generatoren samt tab i frekvensomformeren. Der er imidlertid heller ikke en øget mekanisk effekt. Den er for alle praktiske forhold som i driftsituationen med to generatordrift og optimal pitchstyring. For at forbedre effektproduktionen i forhold til forsøgsopstillingen er der flere ting der kan gøres. En meget vigtig ting er, at den aerodynamiske udformning af rotoren sker specielt under hensyntagen til at udnytte at vindmøllen kan køre med variabelt omløbstal. Det er derfor ikke på samme måde vigtigt at c_p -kurven er flad over et stort vindhastighedsinterval, som det er tilfældet når vindmøllem kører med fast omløbstal. Det er vigtigere at man har en høj c_p -værdi, under forudsætning af at man kan styre omløbstallet, så rotoren kommer til at arbejde meget tæt på den optimale c_p -værdi. Yderligere viser målingerne at man skal være meget opmærksom på tabene i frekvensomformeren men også i generatoren. Det er således meget vigtigt, at der opnåes en forbedret elektrisk virkningsgrad i forhold til forsøgsopstillingen. Brug af en moderne frekvensomformer med en højere skiftefrekvens og dermed en bedre kurveform for strøm og spænding vil reducere tabene i generatoren - muligvis med noget øgede tab i selve omformeren. Udformningen af det elektriske system bør undersøges nærmere især med henblik på at forbedre virkningsgraden ved dellast.

Brugen af frekvensomformer har resulteret i en meget bedre begrænsning af

maksimal effekten fra vindmøllen. Der er dog i effekten fra vindmøllen stadig en del variationer i området fra 5 til 16 Hz samt de ovenfor nævnte spikes. Begge disse fænomener hidrører sandsynligvis fra frekvensomformerens og er specifikke for den og vil derfor ikke optræde i andre systemer. Det kan derfor konkluderes at man vil kunne opnå en særdeles god reguleringskvalitet af effekten under effektbegrænsning i et produktionsmodnet system.

Den opnåede strømkvalitet har ikke levet op til forventningerne. En del af grunden er de ovenfor nævnte effektvariationer i frekvensområdet fra 5 til 16 Hz. En anden grund er at frekvensomformerens ikke styrer den reaktive effekt så godt som forventet. Begge dele bidrager til at flickerniveauet ikke er reduceret så meget som forventet. Dette vil kunne forbedres i et produktionsmodnet system.

De mekaniske påvirkninger på gearkassen reduceres som følge af den forbedrede effektregulering. Belastninger på vinger både flap og kantvis ser ikke ud til at ændre sig væsentligt når vindmøllen kører med variabelt omløbstal. Ændringerne er tillige mest i nedadgående retning.

Ud fra et reguleringssynspunkt er der flere konklusioner der kan drages på basis resultaterne fra forsøgssopstillingen. For det første kan der opnås en god effektbegrænsning som det også var forventet. For det andet har både simuleringer og målinger vist at overgangen fra effektoptimering til effektbegrænsning og omvendt er meget kritisk. Det ses i målingerne at det især er i området omkring 11 til 14 m/s, at der er større variationer når vindmøllen er i kører med variabelt omløbstal i forhold til når den er i normal drift. Det bør blandt andet undersøges hvordan ændringer i effektreferencen kan begrænses. Det bør også undersøges, om der kan opnås en forbedret sporing af det virkelige optimum for rotorvirkningsgraden ved en on-line tilpasning af den effekt-omløbstalskurve, der styres efter.

7 Konklusion

Der er opbygget en forsøgssopstilling med en pitchreguleret vindmølle forbundet til elnettet gennem en frekvensomformer, hvilket muliggør at rotoren kan køre med variabelt omløbstal. Der er som ovenfor nævnt indhøstet en række vigtige erfaringer med konceptet.

Det kan konkluderes at der kan opnås en forbedret effektbegrænsning med deraf lavere gearkasselaster og en mindre påvirkning af elnettet. Ved målinger på forsøgssopstillingen er det vist, at det er meget vanskeligt at opnå en forbedret effektproduktion i forhold til normaldrift. Det har tillige vist sig at frekvensomformerens egenskaber er meget vigtige både med hensyn til effektproduktion men også med hensyn til regulering.

Der er stadig en del ting, der bør undersøges nærmere. De vigtigste ting er forbedret aerodynamisk udformning specielt med henblik på variabelt omløbstaldrift, forbedret sporing af den maksimale virkelige C_p -værdi samt forbedring af overgangen mellem effektoptimering og effektbegrænsning.

Der bør ved fremtidigt design af vindmøller med variabelt omløbstal ske en samlet optimering og design af systemet således at alle komponenter er specielt tilpasset konceptet med variabelt omløbstal.

Målesystemet er opbygget som vist på figur 49. Det består af tre målecomputere, M1, S1, S2. S1 er placeret i navet og opsamler via en strain gauge forstærker signaler for flap, kant og hovedakseludbøjning. Signalerne er filtreret i strain gauge forstærkeren med en afskæringsfrekvens på 10 Hz. Dataene bliver transmitteret via slæberinge som digitalt signal til S2. S2 er placeret i nacellen og opsamler yderligere herfra. Pitch reference og pitch vinkel signalerne er målt via skilleforstærkere med en responstid på højst 25 ms. Via optisk kabel bliver disse data transmitteret til M1, der er placeret i en campingvogn på jorden. M1 får tillige signaler fra meteorologimast og fra to elektrisk effektmålere, POWMEAS. De analoge signalerne til M1 føres via en terminalboks med overspændingsbeskyttelse og et filter med 20 Hz afskæringsfrekvens. Dataopsamlingen sker med 32 Hz. Der bliver beregnet 1 minut statistik (middelværdi, standardafvigelse, maximum og minimum). Der kan tillige opsamles tidsspor.



1. Flap_Bnd:double
2. Edge_Bnd:double
3. Hub_3_zero:double
4. Shaft_Trq:double
5. Hub_Zero:double
6. Hub_Vcc:double

7. Hub_serial:double
8. Nac_Acc:double
9. Yaw :double
10. Pitch_ref:double
11. Pitch :double
12. WT_stat:double
13. Grid_stat:double
14. Freq_stat:double
15. Nac_Zero:double
16. Ser_stat:double
17. wsp :double
18. wsp_ref:double
19. sin :double
20. cos :double
21. Wind_dir:double
22. Temp :double
23. Pres :double
24. Rain :double
25. TW_BND_0_180:double
26. TW_BND_90_270:double
27. POW_REF:double
28. FREQ_REF:double
29. Torq_REF:double
30. RPM :double
31. zero_15:double
32. zero_16:double
33. P_GRID:double
34. Q_GRID:double
35. Vrms_GRID:double
36. Irms_GRID:double
37. PERtime_GRID:double
38. COSPHI_GRID:double
39. zero_7:double
40. zero_8:double
41. P_FREQ:double
42. Q_FREQ:double
43. Vrms_FREQ:double

- 44. Irms_FREQ:double
- 45. PERtime_FREQ:double
- 46. COSPHI_FREQ:double
- 47. Voltech_RH1:double
- 48. Voltech_RH2:double
- 49. Scan_dur:double
- 50. Int_dur:double

Bibliographic Data Sheet**Risø-R-1072(DA)**

Title and author(s)

Combined variable speed/variable pitch controlled 3-bladed wind turbine:
Comparison of pitch controlled wind turbine and combined variable speed/variable
pitch controlled wind turbine

Henrik Bindner, Anca Hansen

ISBN

87-550-2441-6

ISSN

0106-2840

Dept. or group

Wind Energy and Atmospheric Physics

Date

December 1998

Groups own reg. number(s)

EDS-1115007-00

Project/contract No.

1363/96-0002

Pages

41

Tables

1

Illustrations

49

References

0

Abstract (Max. 2000 char.)

The current report is part of the reporting of the project 'Combined variable speed/variable pitch controlled 3-bladed wind turbine. The objective of the project is to investigate a 3-bladed wind turbine with variable speed and variable pitch. Included in the investigation are assessments of the power production, the power quality and structural loads on the wind turbine. The project includes both theoretical and practical investigations.

The current report (R-1072) is one of two reports. The other report, R-1071 'Control strategies', includes development of the control strategies as well as model development.

The control strategies presented in R-1071 have been tested on the test facility that consists of a Vestas V29-225 kW wind turbine, a ABB SAMI STAR 400 kVA four-quadrant frequency converter and a data acquisition system. Measurement results from the test facility are presented in the current report. Comparisons are made between pitch controlled and combined variable speed/variable pitch controlled operation.

The project partners were Vestas Wind Systems A/S, ABB Energy og Industry A/S and Risø National Laboratory. The project was partly funded by the Danish Energy Agency, jour. no. 1363/96-0002.

Descriptors INIS/EDB

CONTROL; FREQUENCY CONVERTERS; PERFORMANCE; SPEED
REGULATORS; VARIATIONS; VELOCITY; WIND TURBINES

Available on request from:

Information Service Department, Risø National Laboratory

(Afdelingen for Informationservice, Forskningscenter Risø)

P.O. Box 49, DK-4000 Roskilde, Denmark

Phone (+45) 4677 4004 · Fax (+45) 46 77 40 13